



RELICTA MONOGRAFIEËN 21

ARCHEOLOGIE, MONUMENTEN- & LANDSCHAPSONDERZOEK IN VLAANDEREN

In dialoog met bodems

Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

Roger Langohr, Carole Ampe, Jari Hinsch Mikkelsen, Marnix Pieters en Femke Germonpré (red.)

IN DIALOOG MET BODEMS VELDBODEMKUNDE VOOR ARCHEOLOGISCH ONDERZOEK

Carole Ampe
Peter De Wilde
Femke Germonpré
Roger Langohr
Sylvia Mazereel
Jari Hinsch Mikkelsen
Veerle Vanwesenbeeck



COLOFON

Reeks

Relicta Monografieën 21
Archeologie, Monumenten- en
Landschapsonderzoek in Vlaanderen

Titel

In dialoog met bodems
Veldbodembkunde voor archeologisch onderzoek

Redactie

Roger Langohr, Carole Ampe, Jari Hinsch Mikkelsen,
Marnix Pieters en Femke Germonpré

Vormgeving en beeldredactie

Sylvia Mazereel

Omslagfoto

Kerkhove 'Stuw', Kluisbergen, provincie Oost-Vlaanderen, België. @Jari Hinsch Mikkelsen.

Jaar van uitgave

2025

Een uitgave van agentschap Onroerend Erfgoed

Wetenschappelijke instelling van de Vlaamse Overheid, Beleidsdomein Omgeving

Verantwoordelijke uitgever

Peter De Wilde en Raakvlak
Dit werk is beschikbaar onder de Modellicentie
Gratis Hergebruik v1.0. Dit werk is beschikbaar
onder een Creative Commons Naamsvermelding
4.0 Internationaal-licentie. Bezoek <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> om een kopie te zien van de licentie.

Wijze van citeren

Langohr, R., Ampe, C., Mikkelsen, H. J., Pieters, M. & Germonpré, F., 2025 (red.). In dialoog met bodems. Veldbodembkunde voor archeologisch onderzoek. Relicta Monografiën 21, 474 pp.

<https://doi.org/10.55465/AWZG6801>

ISBN 9789075230871

D/2025/3241/310

Illustraties

Bvd	Bas Van der Veken	Regionaal Landschap, Kleine en Grote Nete
BVv	Brigitte Van Vliet	Université de Bretagne Occidentale
CA	Carole Ampe	Vlaamse Landmaatschappij
FD	François Dunant	Zwitserland
FG	Femke Germonpré	Raakvlak
GN	Gunther Noens	Ruben Willaert bvba
HM	Hans Mestdag	agentschap Onroerend Erfgoed
HV	Hilde Verboven	agentschap Onroerend Erfgoed
JB	Jan Bastiaens	agentschap Onroerend Erfgoed
JM	Jari Hinsch Mikkelsen	Raakvlak
JS	Jacky Semey	collectie J. Semey, Vakgroep Archeologie, Ugent
KV	Kris Vandevorst	agentschap Onroerend Erfgoed
LV	Luc Van Impe	agentschap Onroerend Erfgoed
MP	Marnix Pieters	agentschap Onroerend Erfgoed
NI	Nico Inslegers	Raakvlak
RL	Roger Langohr	Universiteit Gent
SB	Shawn Bubel	Canada
SC	Stefan Corveleyn	agentschap Onroerend Erfgoed
SD	Stefaan Dondeyne	Universiteit Gent
SM	Sylvia Mazereel	agentschap Onroerend Erfgoed
TV	Tore Sveistrup	Noorwegen
	Raakvlak	Onroerend Erfgoed Brugge en Ommeland

Uitgegeven door

agentschap Onroerend Erfgoed (OE)

www.onroerenderfgoed.be

en

Raakvlak - intergemeentelijke Onroerenderfgoed-
dienst (IOED) van Brugge en Ommeland

www.raakvlak.be

Met dank aan

Griet Lambrecht en Jan Vandrope (taalcorrectie)
Vlaamse Landmaatschappij en de Belgian Soil Science Society (sponsors)

Druk

www.Hdruk.be

IN DIALOOG MET BODEMS

Bodem is een veelgebruikt woord met talrijke betekenissen en nuances: een glas leegdrinken tot op de bodem (ad fundum), een bodemloos vat, de bodemkoers van een aandeel, iets tot op de bodem uitzoeken ... In dit boek bedoelen de auteurs met bodem iets helemaal anders. Het gaat om het bovenste, aan de oppervlakte liggende, losse, driedimensionale deel van de aardkorst waarin de planten geworteld zijn, dat een waaier aan dieren en andere organismen huisvest en waarin allerlei processen plaatsvinden, zoals infiltratie van regenwater of accumulatie van organisch materiaal. Die bodem is onmisbaar voor de voedselproductie wereldwijd via de landbouw. Het is een levensnoodzakelijk goed van onze planeet waarvoor we zorg moeten dragen. Minder bekend is dat die bodem ook een schat aan informatie herbergt over zijn eigen ontstaan en evolutie. En laat dat nu net de informatie zijn die interessant is voor archeologen. Zij graven altijd in dat bovenste deel van de aardkorst en treffen er vaak bodemkenmerken aan die niet eenduidig of gemakkelijk te interpreteren zijn.

Bodemkundig onderzoek begint met een correcte registratie van de bodemkenmerken tijdens het veldwerk. Om het beschrijven en registreren daarvan te ondersteunen, publiceerde het agentschap Onroerend Erfgoed in 2022 een 'Veldhandleiding voor het beschrijven van bodems bij archeologisch onderzoek in Vlaanderen'. Die veldhandleiding is bedoeld om mee te nemen op het terrein. Het boek dat nu voorligt 'In dialoog met bodems. Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek', reikt de nodige sleutels aan voor het vervolg van het bodemkundig onderzoek. Centraal staat de interpretatie van de geobserveerde bodemkenmerken, om zo door te dringen tot de ziel van de plek. Het ondersteunt de tweede stap van het bodemkundig onderzoek en genereert zo boeiende verhalen.

Dit boek vormt een gecondenseerde neerslag van de lessen bodemkunde die prof. em. dr. Roger Langohr decennialang gaf aan de Universiteit Gent. De belangrijkste bodemvormende processen en kenmerken die in Vlaanderen voorkomen, zijn helder uitgelegd dankzij een uitgebreide selectie foto's, van overzichts- tot detailfoto's. Dat beeldmateriaal is afkomstig van de talrijke veldobservaties uitgevoerd over een periode van meer dan zestig jaar in binnen- en buitenland en meestal vanuit een archeologische of bodemgenetische vraagstelling.

De onderwerpen die aan bod komen zijn divers: de kleur en de structuur van de bodem, bioturbatie door dieren en planten, organische en minerale (klei) colloïdenmigratie, podzolen en waterhard, periglaciale processen en kryoturbatie en tot slot erosie- en sedimentatieprocessen. Een belangrijk aspect bij al deze thema's is hoe bodemkundige processen artefacten kunnen verplaatsen of archeologische structuren kunnen aantasten. Zo zijn omvergewaaiden bomen of andere klimaatomstandigheden soms verantwoordelijk voor het merkwaardige verspreidingspatroon van vuurstenen artefacten in de bodem. Ook vries-dooicycli kunnen sporen nalaten, bijvoorbeeld door de vorming van een kapsel (*capping*) bovenop de stenen artefacten.

Het boek, met zijn talrijke illustraties en referenties, is een onontbeerlijk naslagwerk voor het aardkundig onderzoek op archeologische sites en helpt bij de interpretatie van de geobserveerde kenmerken en processen. De vele foto's nodigen iedereen uit die in natuur en cultuur geïnteresseerd is. Het boek is dus niet alleen nuttig voor archeologen die hun kennis willen uitbreiden over de aardkundige aspecten van het archeologisch onderzoek. Ook geologen, geografen, biologen, bio-ingenieurs, en andere belangstellenden vinden er waardevolle informatie over de rijkdom van het bodemarchief. Zo kan dit boek de lezer inspireren, begeistern en op weg zetten om het 'boek van de natuur' beter te lezen en te begrijpen.

We zijn tot slot als agentschap Onroerend Erfgoed fier dat we hebben bijgedragen aan dit referentiewerk en bedanken hierbij Raakvlak en de Vlaamse Landmaatschappij voor de vlotte samenwerking voor de publicatie van dit boek.

Peter De Wilde
Administrateur-generaal
Agentschap Onroerend Erfgoed

INLEIDING

1.	LEESWIJZER.....	11
2.	WAAROM DEZE BODEMHANDLEIDING?	12
3.	WAT KAN EEN BODEM VERTELLEN?	13

VOORBEREIDEN EN UITVOEREN VAN AARDKUNDIG ONDERZOEK

1.	INLEIDING	23
2.	DATABANK ONDERGROND VLAANDEREN	23
2.1.	Geologische informatie	23
2.2.	Bodemkundige informatie	27
3.	VELDPLANNING EN MATERIAAL	32
3.1.	Klimatologische data	32
3.2.	LiDAR.....	33
3.3.	Veldplanning	33
3.4.	Veldmateriaal.....	34
3.5.	Manuele grondboren en hun bodemgeschiktheid	39
3.6.	De Munsell kleurenkaart.....	44
3.7.	Gebruik van veldtesten	44
3.8.	Types veldwerk	46
4.	VELDREGISTRATIES: LOKALISATIE, ORIËNTATIE EN VOORBEREIDING VAN EEN BODEMOBSERVATIE.....	54
4.1.	De boring	54
4.2.	Het bodemprofiel.....	62
4.3.	Bodemstaalname	65
4.4.	Foto-opnames.....	71

BODEMKLEUR

1.	INLEIDING	81
2.	DE OORSPRONG VAN BODEMKLEUR.....	85
3.	DE NAAM VAN DE KLEUR.....	91
4.	HOE KLEUR METEN	95
5.	KLEURVLEKKEN.....	98
6.	GEBRUIK VAN KLEUR IN BODEMCLASSIFICATIE	106

BODEMSTRUCTUUR, DRUK EN COMPACTIE

1.	INLEIDING	109
2.	AGGREGATEN OF STRUCTUUREENHEDEN	109
3.	PROCESSEN VERANTWOORDELIJK VOOR DE VORMING VAN BODEMSTRUCTUUR..	109
4.	BELANGRIJKSTE AGGREGAATVORMEN	109

5.	STRUCTURATIE EN DESTRUCTURATIE	110
6.	STRUCTUUR, MORFOLOGIE EN VERBAND MET HET MILIEU	110
6.1.	Primaire en secundaire structuur, structuurgradiënten, methode van structuurobservatie ..	110
6.2.	Sferische structuur	112
6.3.	Plaatstructuur	115
6.4.	Blokstructuur	118
6.5.	Prismastructuur	120
6.6.	Vesiculaire (blaasvormige) structuur.....	137
6.7.	Bodems zonder structuur	138
7.	DRUK EN COMPACTIE IN BODEMS	139
7.1.	Druk en bodemkleur	139
7.2.	Vries/dooi cycli en druk in het bodemprofiel.....	139
7.3.	Vochtig/droog cycli en druk in bodems met zwellende kleien	139
7.4.	Vegetatie en druk in de bodem.....	141
7.5.	Neerslaan en groei van kristallen en concreties uit een oververzadigde bodemoplossing.....	141
7.6.	Permanente verdichting door menselijke impact	144

ORGANISCHE EN MINERALE (KLEI) COLLOÏDENMIGRATIE

1.	INLEIDING	151
2.	BASISKENMERKEN VAN BODEMCOLLOÏDEN	153
3.	BODEMEVOLUTIE IN VLAANDEREN EN HET PROCES VAN MINERALE- EN ORGANISCHE COLLOÏDENMIGRATIE	154
4.	KLEI- EN ORGANISCHE COLLOÏDENMIGRATIE IN BANDEN	159
5.	TUSSENKOMST VAN DE MENS	164

PODZOLEN EN WATERHARD. MIGRATIE EN AANRIJING VAN OPLOSBARE ORGANISCHE STOFFEN IN BODEMS

1.	INLEIDING	177
2.	DE KLEUR VAN ORGANISCHE STOF IN DE PODZOLHORIZONT	178
3.	PODZOLEN IN BELGIË.....	178
3.1.	Algemeen	178
3.2.	IJzer- of bospodzolen	180
3.3.	Humus-ijzerpodzolen, of de menselijke invloed op de bodemgenese in de Belgische zandstreek.....	184
3.4.	Humuspodzolen en/of grondwaterpodzolen	189
3.5.	De postpodzol, een antropogene bodemdifferentiatie tussen Vlaanderen en de Kempen....	192
3.6.	Samenvatting van de bodemevolutie in de zandstreek	198

3.7. Micropodzolen	201
3.8. De placic horizont	205
3.9. IJzeroer (oerijzer, moerasijzer)	206
4. BODEMS MET WATERHARDLAAG	209

PERIGLACIALE PROCESSEN EN KRYOTURBATIE

1. INLEIDING	217
1.1. Verspreiding van periglaciale processen	217
1.2. Specifieke eigenschappen van water	217
1.3. Eigenschappen van water en ijs en het vries/dooi proces in de bodem	218
1.4. Chronologie van de laatste ijstijd, het Weichseliaan, en de evolutie van het bodemlandschap.....	221
1.5. Verspreiding van periglaciale sporen van het Weichseliaan in België.....	224
2. VRIES/DOOI PROCESSEN	225
2.1. Vries/dooi aan het bodem-oppervlak	225
2.2. Vorstpenetratie en dooi in een vochtige grond met homogene textuur, met of zonder grove elementen	227
2.3. Vorstpenetratie en dooi in een waterverzadigde bodem met homogene textuur en met grove elementen	234
2.4. Vorstpenetratie en dooi in een waterverzadigde bodem (watertafel) met contrasterende textuurlagen.....	240
3. PERMAFROST	243
3.1. Inleiding	243
3.2. Ontwikkeling van een fragipan: een onderschatte bodemkundige proxy voor permafrost....	244
3.3. Ontstaan van ijswiggen	251
3.4. Ontstaan van grondwiggen	255
3.5. Ontstaan van palsa's, pingo's en lithalsa's.....	258
4. EROSIE TE WIJTEN AAN VRIES-DOOI AL DAN NIET ONDER PERMAFROST OMSTANDIGHEDEN	265
4.1. Naaldijs	265
4.2. Oppervlakkige kryoreptatie	265
4.3. Interne kryoreptatie.....	267
4.4. Gelifluctie (solifluctie)	269
4.5. Betreding en brand	270
4.6. Nivatie	271
4.7. Themokarst	272
5. IMPACT VAN PERIGLACIALE PROCESSEN OP ARCHEOLOGISCHE SITES	274

BODEMBIOTURBATIE DOOR DIEREN

1.	INLEIDING	281
2.	BODEMBIOTURBATIE DOOR DIEREN	284
2.1.	Fauna die het bodemoppervlak verstoort	284
2.2.	Dieren die graven	304

BODEMBIOTURBATIE DOOR PLANTEN

1.	STRONKEN EN WORTELS VAN BOMEN, SPOREN DIE VERDWIJNEN	341
2.	ONTWORTELDE BOMEN	349
3.	TYOLOGIE VAN WINDWORPSTRUCTUREN	356
4.	WINDWORPSTRUCTUREN IN HET BODEMPROFIEL	368
5.	WINDWORPSTRUCTUREN, KANSSEN VOOR BIODIVERSITEIT	374
6.	WIEGENDE BOMEN	376
7.	TAKKEN EN PSEUDOPALEN	379
8.	WORTELS EN PAALGATEN	383

EROSIE EN SEDIMENTATIE

1.	INLEIDING	391
1.1.	Geologische en versnelde erosie	391
1.2.	Belang van erosie en sedimentatie op archeologische sites	396
1.3.	Kartering	402
1.4.	Bodemreferentieprofielen	403
2.	MENSELIJKE ACTIVITEITEN DIE EROSIE KUNNEN VEROORZAKEN	403
2.1.	Erosie door menselijke activiteiten op landschapsniveau	403
2.2.	Erosie/sedimentatieprocessen op archeologische structuren	407
3.	VORMEN VAN BODEMEROSIE DOOR WATER	412
3.1.	Het uiteenvallen van de bodemstructuur en verslemping	412
3.2.	Spaterosie: bodemerrosie door de inslag van regendruppels	414
3.3.	Diffuse oppervlakkige afvloeï	415
3.4.	Geulerosie	419
3.5.	Ravijnvorming en regressieve erosie	421
4.	FLUVIATIELE EROSIE EN SEDIMENTATIE	422
5.	EROSIE DOOR ZWAARTEKRACHT: MASSABEWEGINGEN OF HELLINGSPROCESSEN	425
5.1.	Vallen/instortingen	426
5.2.	Kruipen	428
5.3.	Solifluctie	430
5.4.	Grondverschuiving of grond-verglijding	432
5.5.	Vloeien - Modderstroom	434

6.	WINDEROSIE	436
7.	ANDERE VORMEN VAN EROSIE	440
7.1.	Bewerkingserosie	440
7.2.	Oogsterosie	443
7.3.	Erosie langs paden, wegen en in groeven	444
8.	ANTROPOGENE INGREPEN OP DE TOPOGRAFIE	446
8.1.	Terrassen	446
8.2.	Aanleg van bolle akkers.....	448
8.3.	Het afsteken van plaggen.....	451
8.4.	Rabattensysteem.....	453
8.5.	Graaf-, opvul-, egalisatiewerken voor landbouw, woningbouw, weg- en grafconstructies	455
9.	SEDIMENTATIE	464
9.1.	Antropogeen colluvium.....	464
9.2.	Alluvium	469

IN DIALOOG MET BODEMS VELDBODEMKUNDE VOOR ARCHEOLOGISCH ONDERZOEK

INLEIDING



AUTEURS : ROGER LANGOHR
JARI HINSCH MIKKELSEN
CAROLE AMPE

1. Leeswijzer

Bij een bodemonderzoek wordt op een zorgvuldig gekozen locatie een bodemprofiel met de hand uitgegraven. Naargelang het bodemtype kan het graven en geschikt maken van een bodemprofiel voor het beschrijven ervan, variëren van enkele uren tot een volledige dag. Het graven van een profielput zoals in niet gecementeerde podzolbodems gaat vrij gemakkelijk. Zij hebben een zandige textuur, soms een diepe grondwatertafel en vaak een prachtig kleurenpalet. Leembodems hebben meestal een diepe watertafel en zijn vrij stabiel, waardoor ze relatief snel kunnen worden uitgegraven vooral als de klei-aanrijkingshorizont is doorbroken. Dan zijn er de alluviale en estuariene bodems, zware kleibodems die in de diepte vaak nog onrijp zijn. Het maken van een profielput is hier een echte uitdaging. Tot slot vormen de veenbodems een aparte categorie, hier is de boodschap om snel een profielput te graven en te beschrijven omdat bij blootstelling aan de lucht het veen verandert van kleur.

Het samenwerken tussen bodemkundigen en archeologen biedt waardevolle inzichten voor beide disciplines. Bodemkundigen gespecialiseerd in bodemmorfologie en genese werken graag samen met archeologen. Waar een aardkundige gemiddeld één bodemprofiel per dag kan graven en beschrijven, biedt een archeologische site vaak de mogelijkheid om op korte tijd snel en efficiënt data te verzamelen. Archeologische sites stellen de bodemkundige in staat om relatief ongestoorde bodemprofielen te bestuderen en ze te vergelijken met archeologische bodems. Het onderscheid tussen natuurlijke en archeologische bodemlagen en de invloed van menselijke activiteit op het bodemarchief, is van groot belang voor zowel aardkundigen als archeologen. Dit draagt bij tot een beter begrip van de menselijke geschiedenis en de evolutie van het landschap.

In 2022 verscheen de publicatie *‘Veldhandleiding voor het beschrijven van bodems bij archeologisch onderzoek in Vlaanderen’* (Mikkelsen et al., 2022). In de veldhandleiding ligt de nadruk op de praktische uitvoering van een bodembeschrijving op het terrein. Achtergrondinformatie over de bodemkenmerken en de bodemvormende processen is beperkt tot de essentie. Het voorliggend boek *‘In dialoog met bodems. Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek’* gaat dieper in op de thema’s (tabel A1) die belangrijk zijn bij het archeologisch onderzoek. De ervaringen die de auteurs, met als hoofdauteur

prof. Em. R. Langohr, doorheen tientallen jaren hebben opgedaan, vormen de basis van dit boek.

In het eerste thema is te lezen hoe de voorbereiding van het terreinwerk het best verloopt, welk materiaal er kan gebruikt worden en hoe men het terreinwerk aanpakt. In de twee volgende thema’s zijn de bodemkenmerken zoals kleur en structuur uitgelegd aan de hand van talrijke voorbeelden en foto’s. Kleimigratie en het verplaatsen van ijzer, aluminium en organisch materiaal zijn twee belangrijke bodemvormende processen voor de bodems in Vlaanderen; ze worden telkens in een thema behandeld. Het thema periglaciaire processen en kryptoturbatie lijkt minder relevant onder de huidige klimaatomstandigheden, toch vertonen de landschappen en bodems in Vlaanderen duidelijke sporen die het gevolg zijn van deze processen in het verleden. In de thema’s bodembioturbatie door planten en dieren wordt aangetoond wat het effect van planten en dieren kan zijn op het verplaatsen van artefacten. Het thema erosie/sedimentatieprocessen behandelt eerst het onderscheid tussen geologische en versnelde erosie waarna verder wordt ingegaan op het belang van referentieprofielen, de verschillende vormen van versnelde erosie en het herkennen van erosie/sedimentatieprocessen op een archeologische site.

Met dit boek *‘In dialoog met bodems. Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek’* bieden we een referentiekader voor bodemkundig onderzoek op archeologische sites in Vlaanderen aan. We hopen hiermee de dialoog met het bodemarchief bijkomend te inspireren.

Thema	Illustraties beginnen met de letter
Inleiding	A
Vorbereiden en uitvoeren van aardkundig onderzoek	B
Bodemkleur	K
Bodemstructuur, druk en compactie	S
Organische en minerale (klei) colloïdenmigratie	C
Podzolen en waterhard	P
Periglaciaire processen en kryptoturbatie	G
Bodembioturbatie door dieren	D
Bodembioturbatie door planten	V
Erosie en sedimentatie	E

Tabel A1: Overzicht van de behandelde thema’s in de publicatie *‘Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek’*.

2. Waarom deze bodemhandleiding?

Voor de beschrijving van een bodemprofiel volgen de bodemkundigen een 'standaard' handleiding die naargelang de lokale noden varieert van land tot land en die ook doorheen de tijd werd aangepast. In de jaren 1930, stelde de '*Soil Conservation Service*' (SCS) van de Verenigde Staten zo'n handleiding op. Deze instelling was verantwoordelijk voor de gedetailleerde bodemkartering van het hele land, het werk van duizenden karteerders. Vandaar was er een behoefte aan een standaard terminologie voor alle bodemkenmerken inclusief de kleur, met het gebruik van de '*Munsell Soil Color Chart*'. De richtlijnen voor het beschrijven van een bodemprofiel werden in een apart hoofdstuk van een '*Soil Survey Manual*' (SSM) (Kellogg, 1937) gepubliceerd. Na de Tweede Wereldoorlog beslisten talrijke landen, waaronder België, om een bodemkaart op te stellen wegens de dringende nood aan een verhoogde voedselproductie (ruilverkaveling, drainering, irrigatie, bemesting, ...). Hierbij beslisten de landelijke karteringsinstellingen en de betrokken organisaties veelal om grotendeels de richtlijnen van de al gepubliceerde *Soil Survey Manual* te volgen.

In 1947 werd in België het 'Comité voor het opnemen van de Bodemkaart en de Vegetatiekaart' op initiatief van het 'Instituut tot Aanmoediging van het Wetenschappelijk Onderzoek in de Nijverheid en Landbouw' (IWONL), opgericht. De systematische opname van de bodemkaart werd uitgevoerd door het 'Centrum voor Bodemkartering' (Tavernier, 1950). Voor heel België gebeurde de terreinopname van de bodemkaart op de Popp-kaart (1842-1879), een kadastrale kaart opgemaakt op een schaal tussen 1:1250 tot 1:7500. Deze veldkaarten werden gestandaardiseerd op een schaal 1:5000 (https://poppkad.ugent.be/poppkad_atlaspopk.php). De uiteindelijke bodemkaart werd eerst vereenvoudigd naar schaal 1:10.000 en finaal gepubliceerd op schaal 1:20.000 op een ondergrond van de topografische kaarten van het Militair Geografische Instituut.

Ter voorbereiding van de bodemkaart werd een groot aantal oppervlaktetalen genomen en representatieve bodemprofielen doorheen heel het land beschreven, bemonsterd en geanalyseerd voor een reeks fysische en chemische bodemparameters. Dit gaf enerzijds inzicht in de verspreiding en variatie van bepaalde bodemtypes zoals de zandlemige, zandige of lemige gronden, anderzijds dienden deze

profielen als referentie voor het trainen van de talrijke bodemkarteerders verantwoordelijk voor de terreinopnames. Het 'Centrum voor Grondonderzoek' was verantwoordelijk voor de bodemprofielbeschrijvingen en bodemanalysen (Van Ranst & Sys, 2000). Voor het Vlaamse deel van de bodemkaart was het Centrum bij de landbouwfaculteit van de Universiteit Gent ondergebracht, voor het Waalse deel van de bodemkaart was de '*Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux*' verantwoordelijk.

Omdat Professor R. Tavernier, hoofd van de Belgische bodemkartering, goede contacten had met de Amerikaanse collega's van de *Soil Conservation Service*, werden heel wat elementen van de *Soil Survey Manual* in het Belgische systeem overgenomen. Bepaalde bodemkenmerken kregen evenwel een aangepaste terminologie, zoals bijvoorbeeld de textuurklassen voor de bodemkorrelgrootte. In plaats van de internationale klassenindeling (figuur A1) te gebruiken, werd een indeling ingevoerd die beter aan het geheel van de Belgische bodems was aangepast (figuur A2). Zo komen er in België proportioneel weinig kleiige bodems voor, met uitzondering van de polders en sommige alluviale bodems, maar veel zandige en lemige bodems. Vandaar zijn er weinig onderverdelingen onder de kleiige bodems ($n = 2$) en meerdere textuurklassen voor de zand- en leembodems ($n = 5$). Ook voor de draineringsklassen werden wijzigingen ingevoerd. Uit de *Soil Survey Manual*, werden de standaard draineringsklassen overgenomen ('te sterk, goed, matig goed, imperfect, matig slecht, slecht en zeer slecht gedraineerd'), maar heeft men het concept van stuwwatertafel en permanente grondwatertafel toegevoegd. Deze benadering is overgenomen van de Duitse bodemkartering (pseudogley en gley concepten, zie Schlichting, 1973). De handleiding voor het beschrijven van bodemprofielen kreeg de naam van 'Schema voor profielbeschrijving'.

In de jaren 1950-1960 hadden bijna alle Europese landen een karteringsinstituut en een eigen bodemclassificatiesysteem. De bodemkenmerken die werden opgenomen en de analyses die werden uitgevoerd, waren vooral gericht op de groei van gewassen en het leveren van gegevens nodig voor de bodemclassificaties. Zo kan men bijvoorbeeld nog een 'imperfect gedraineerde bodem' zonder drainering bewerken, maar een 'matig slecht gedraineerde bodem' zal men voor de teelt van een gewas wel

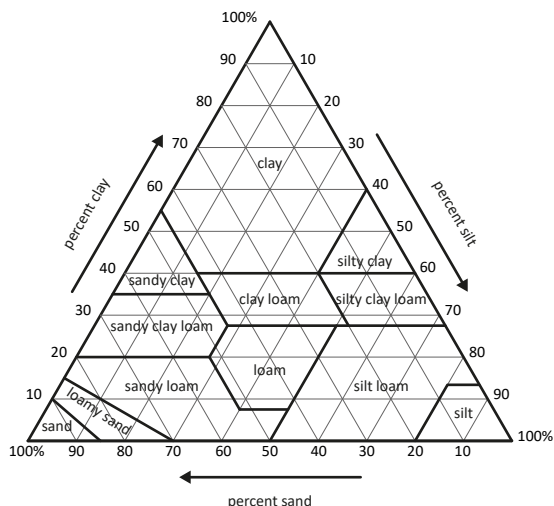


Fig. A1: Textuurdriehoek met textuurklassen gebruikt door United States Department of Agriculture. (Soil Survey Staff, 1951).

moeten draineren. Voor een grasland kan zo'n matig slecht gedraineerde bodem wel nog geschikt zijn.

Vanaf de jaren 1980, is men echter geleidelijk aan van paradigma veranderd. Nieuwe opdrachten vroegen aandacht voor onderwerpen zoals pollutie, ecologie, behoud van organische stof, biodiversiteit enzovoort. Als gevolg hiervan zijn de richtlijnen bijgewerkt. Dit is ook het geval geweest voor de *FAO Guidelines for Soil Description* (FAO, 2006) die aan de grondslag ligt voor de 'Veldhandleiding voor het beschrijven van bodems bij archeologisch onderzoek in Vlaanderen' (Mikkelsen *et al.*, 2022). Deze handleiding is dus aangepast aan de specifieke noden voor het archeologisch onderzoek in Vlaanderen met talrijke vereenvoudigingen, maar ook uitbreidingen en aanpassingen die relevant zijn voor een archeobodemkundige benadering van het bodemonderzoek.

Slechts zelden wordt op archeologische sites een volledige bodemprofielbeschrijving uitgevoerd. Meestal kiest men voor een reeks kenmerken die belangrijk zijn voor de vragen die door de archeologen worden gesteld of die helpen bij eventuele (paleo)milieureconstructies. Een uitzondering is het eventueel opnemen, indien aanwezig, van een **referentiebodemprofiel**. Dit bodemprofiel maakt het mogelijk om te achterhalen welk bodemlandschap er aanwezig was op de site, in de periode van interesse voor de archeoloog.

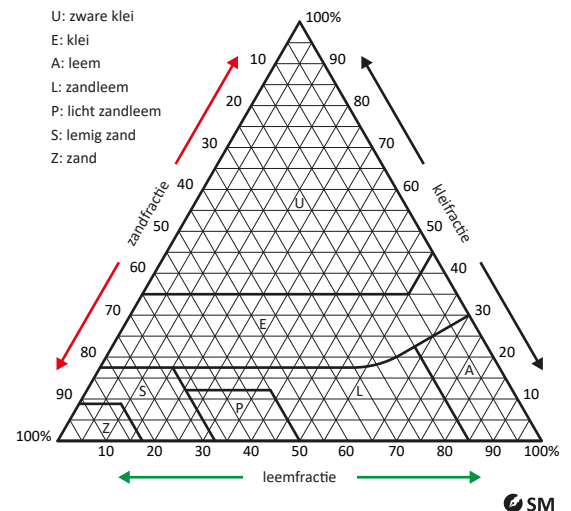


Fig. A2: De fijne minerale bodemfractie (<2 mm) en de textuurklassen gebruikt bij de Belgische bodemkartering. (Centrum voor bodemkartering, 1954 in Tavernier & Maréchal, 1958).

3. Wat kan een bodem vertellen?

De bodem is het bovenste deel van de aardkorst, de lithosfeer, die onder invloed staat van het klimaat en waar interacties plaatsgrijpen met de hydrosfeer en biosfeer (fig. A3). Bodemvormende processen veranderen het moedermateriaal onder invloed van externe en interne milieufactoren. De primaire kenmerken van het moedermateriaal worden langzamerhand vervangen door secundaire bodemkenmerken. Sommige bodemkenmerken zijn gevormd onder bodemvormende factoren die een verschillende intensiteit of andere kenmerken hadden dan de huidige (bijvoorbeeld een ander klimaat, vegetatie, bodemgebruik, ...) zodat de bodem een belangrijke bron van informatie is over vroegere milieumstandigheden (Ampe, 2015).

De juiste vraagstelling in combinatie met een degelijke uitgevoerde bodembeschrijving, al dan niet aangevuld met een gerichte staalname voor verdere analyses, vormt een bijzonder waardevol instrument om de evolutie van een archeologische site in kaart te brengen. Een voorbeeld van het verhaal van een bodem volgt hieronder (figuur A4).

14 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

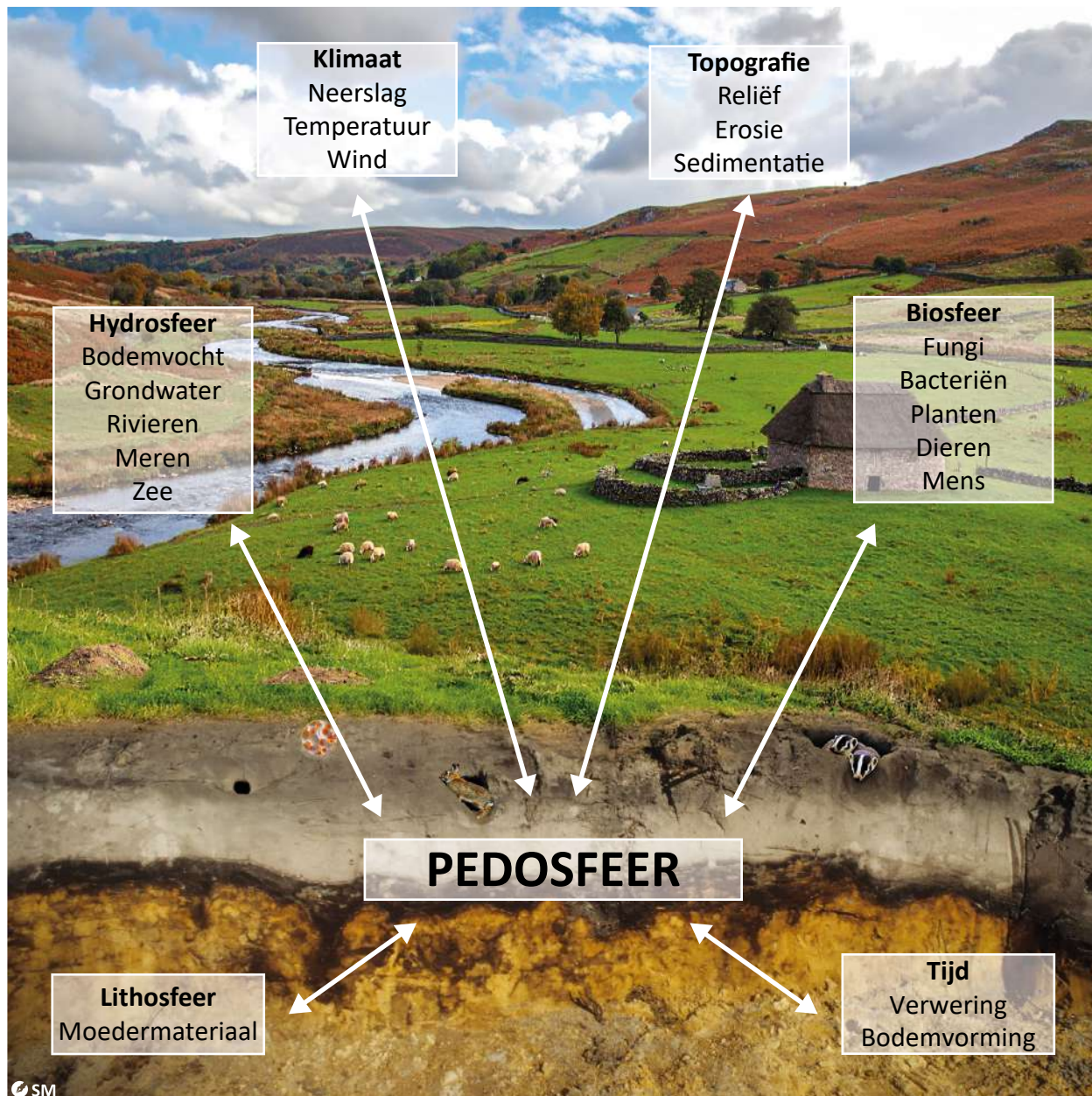
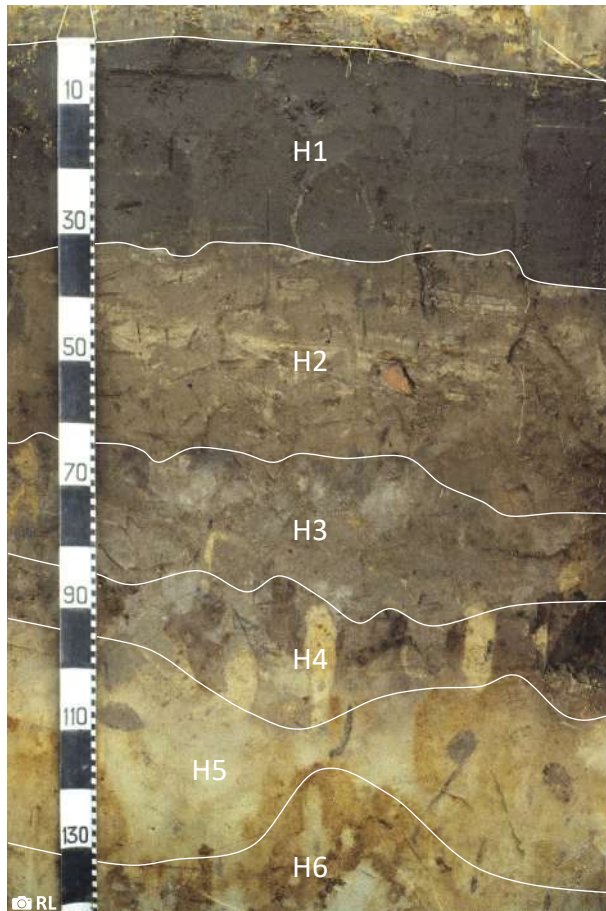


Fig. A3: De profielopbouw en de samenstelling van een bodem kunnen sterk variëren. De bodem vormt het raakvlak tussen atmosfeer, hydrosfeer, lithosfeer en biosfeer. De bodem is het resultaat van een wisselwerking tussen verschillende bodemvormende factoren, zoals klimaat, topografie, hydrosfeer, biosfeer, lithosfeer, tijd en moedermateriaal. Deze factoren werken niet alleen in op de bodem, maar ze beïnvloeden ook dikwijls elkaar. Op hun beurt beïnvloeden de bodemvormende factoren de aard en de intensiteit van de bodemvormende processen. Al deze interacties maken van de bodem een complex geheel. Voor een goed begrip van het bodemsysteem, is er een grondige kennis van de bodemvormende factoren en processen nodig. (Landschap gegenereerd met Adobe Firefly).



- H1: 0-30/40 cm: Ap1; huidige ploeglaag, regenwormgangen, maar geen sporen van mollen.
- H2: 30/40-62/77 cm: Ap2; tweede ploeglaag, regenwormgangen, maar geen sporen van mollen.
- H3-H5: restanten van een begraven podzol.
- H3: 62/77-80/93 cm: E; oorspronkelijk lichtgrijze uitlogingshorizont, sterk gebioturbeerd door mollen.
 - H4: 80/93-91/110 cm: Bh; sterk gebioturbeerde podzol humusaanrijkingshorizont.
 - H5: 91/110-118/140+ cm: C; zandig moedermateriaal.
- H6: 118/140+ cm: Bt; klei-aanrijkingshorizont.

Fig. A4: Bodemprofiel met begraven podzolprofiel ligt nabij twee genivelleerde bronstijd *tumuli*. Fig. A4, A11-A12, A14 en A19: Hoge Weg, Gent, provincie Oost-Vlaanderen, België.

H1-H2: Aangebrachte aarde die de oorspronkelijke podzolbodem begraaft, is waarschijnlijk ten dele afkomstig van het nivelleren van de *tumuli*. Dubbele ploeglaag door beddenbouw. Bodems met Ap1- en Ap2-horizonten komen veel voor in zandig Vlaanderen.

De bodem van figuur A4 is ontwikkeld in ontkalkte dekzanden. Aan de hand van gedetailleerde veldobservaties kan men 6 fasen onderscheiden, die tot het huidige bodemprofiel hebben geleid (zie ook thema 'Podzolen en waterhard').

Fase 1: Origineel bodemprofiel onder een gemengd loofbos met de ontwikkeling van een ontkalkte bodem met een kleur-B horizont (A/Bw profiel) (figuren A5-A6).

Fase 2: Rooien van het bos. Op een bepaald tijdstip, waarschijnlijk tijdens de bronstijd, werd het bos gerood en schakelde men over naar begrazing door schapen. Hierdoor verhoogde de waterinfiltratie: onder bos is de evapotranspiratie immers hoger dan onder gras. Door de verhoogde waterinfiltratie verzuurde de bodem sneller en ontstond er mettertijd een heidevegetatie. De verzuring van de bodem, die versterkt werd door de heidevegetatie, leidde tot de ontwikkeling van een podzolbodem met een duidelijke A/E/Bh/Bhs horizontsequentie. Deze bodem was eveneens stikstofarm en vertoonde enkel oppervlakkig bioturbatie (figuren A7-A8). De transformatie van bos tot heide werd wellicht versterkt

door het afplaggen van de graszode voor de aanleg van grafheuvels.

Fase 3: Overschakeling naar een weide met intensieve veebegrazing. Mogelijk is deze fase gebonden aan vlakbij gelegen bewoning. De toevoer van excrementen en urine, verhoogde het stikstofgehalte en de bodem wordt door grote regenwormen (*Lumbricus terrestris*) en mollen (*Talpa europaea*) sterk gebioturbeerd. (figuren A9-A12).

Fase 4: Nivellering van het landschap in functie van landbouw (in de middeleeuwen?). *Tumuli*, rijk aan organische stof, werden genivelleerd; hoger gelegen ruggen werden afgegraven en depressies opgevuld. De site van het profiel, die in een depressie lag, wordt onder 65 cm aarde bedolven (figuren A13-A14).

Fase 5: Toepassing van beddenbouw op de akker: het hoogteverschil bedraagt ongeveer 50-60 cm tussen de bedden en greppelbodem. Winderosie en neerslag vullen de greppels gedeeltelijk met fijn gestratificeerde aarde. Bij teeltwisseling werden de bedden opnieuw aangelegd en dit niet noodzakelijk op dezelfde plaats. Wegens de talrijke cycli van af-

16 – Veldbodembodemkunde voor archeologisch onderzoek

wisselend beddenbouw en een vlakke genivelleerde akker, ontstaat er een tweede bewerkingshorizont (Ap2) met talrijke sporen van de greppels. In deze fase blijven de regenwormen actief, maar de mol- len worden niet meer geduld door de landbouwer (figuren A15-A17).

Fase 6: Ploegen van de bodem: de beddenbouw wordt verlaten en vandaag ploegt men tot ongeveer een 30 cm diepte (figuren A18-A19).

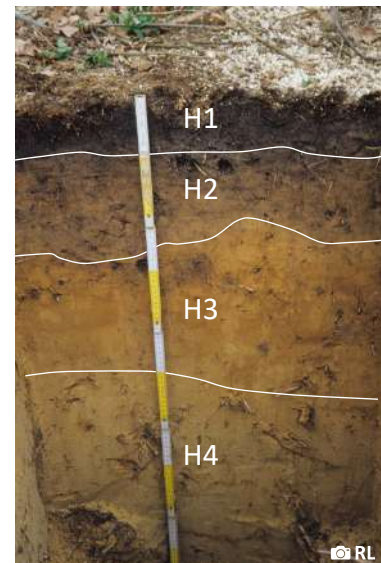


Fig. A5-A6: FASE 1. Gemengd loofbos. Beisbroek, Brugge, provincie West-Vlaanderen, België. Bodemprofiel: H1: 0-8/11 cm: A; zeer humusrijke oppervlaktehorizont. H2: 8/11-20/27 cm: B β ; humusrijke gebioturbeerde B-horizont. H3: 20/27-50/54 cm: Bw1; gekleurde B-horizont rijk aan ijzeroxides. H4: 50/54-75+ cm: Bw2; ontkalkt zand met minder uitgesproken kleur dan H3, talrijke wortels. Fig. A6: Haelen, Nederland.

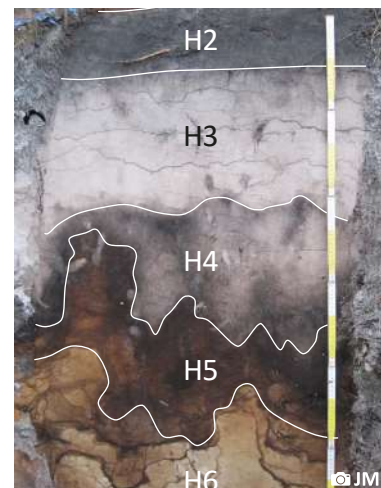


Fig. A7-A8: FASE 2. Heide begraasd door schapen. Fig. A7: Lüneburger Heide, Duitsland. Ontwikkeling van een humus-ijzerpodzol. H1: +8/+3-+3/0 cm: Oi; licht verteerd organisch materiaal afkomstig van naaldbomen. H2: +3/0-11/15 cm: A; zeer donkergrijze humeuze oppervlaktehorizont, zand, geleidelijke overgang naar H3. H3: 11/15-40/51 cm: E1; witte uitlogingshorizont, zand, enkele 3-5 mm dunne, grillige, min of meer horizontale humusmigratiebanden. H4: 40/51-50/79 cm: Bh; zwakke humusaccumulatiehorizont, zand. H5: 50/79-77/103 cm: Bhs; uitgesproken aanrijking met humus en in mindere mate met ijzer, zand. H6: 77/103-120+ cm: Bh2; humusaanrijkingshorizont, zand, donkerbruine irreguliere humusmigratiebandjes 5-10 mm dik. Fig. A8: Landschap De Liereman, Oud-Turnhout, provincie Antwerpen, België.

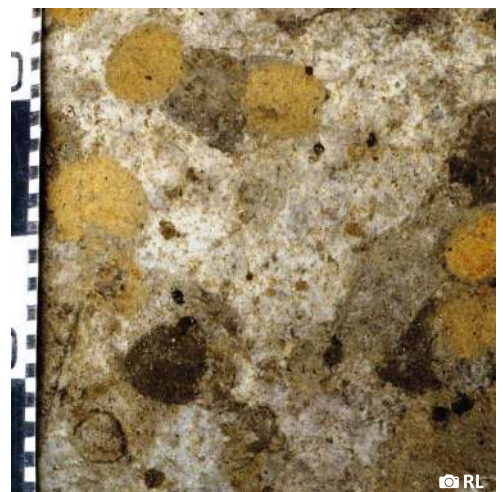


Fig. A9-A12: FASE 3. Overgang naar een begraasde weide met vee. De toevoer van koeienmest en urine verhoogt het stikstofgehalte van de bodem met als gevolg de ontwikkeling van een intensieve regenwormactiviteit die mollen aantrekt (fig. A10). Dit resulteert in een zeer intense bioturbatie (fig. A11 - verticale wand en fig. A12 - horizontaal vlak) met molgalerijen die gevuld geraken met aarde van de hogere (zwart en grijs) (diameter 4-8 cm) en de lagere horizonten (geel); talrijke regenwormgalerijen (diameter een 5-10 mm). Fig. A9: De Braakman, Nederland. Fig. A10: Roosendaal, provincie Noord-Brabant, Nederland.



Fig. A13-A14: FASE 4. Bij het afvlakken van bijvoorbeeld twee *tumuli* wordt de humusrijke aarde in de omgeving uitgespreid. Depressieposities worden opgevuld, waardoor de originele bodem onder 65 cm grond is begraven. Jutland, Denemarken.

18 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



Fig. A15-A17: FASE 5. Periode van beddenbouw.

Fig. A15: De greppels zijn met een spade gegraven; de bodem van de greppels is door gestratificeerde sedimenten bedekt. Sint-Pieters-Leeuw, provincie Vlaams-Brabant, België.

Fig. A16: Doorsnede van twee recente greppels. Brecht, provincie Antwerpen, België.

Fig. A17: Detail van de sedimentaire sporen typisch voor beddenbouw.



Fig. A18-A19: FASE 6. De akker wordt finaal met de kerende ploeg tot ongeveer 30 cm diep bewerkt. Koksijde, provincie West-Vlaanderen, België. Profiel met ploeglaag 30 cm dik. Hoge Weg, Gent, provincie Oost-Vlaanderen, België.

REFERENTIES

Ampe, C., met medewerking van Langohr, R., Van Ranst, R., Finke, P., Deckers, S. & Poesen, J., 2015. Bodem. In: *Geologie Van Vlaanderen* (ed. Borremans, M.), 261-338. Academia Press, Gent, 491 pp.

FAO, 2006. *Guidelines for soil description*. 4th ed., Rome, Italy, pp 97.

Kellogg, C., 1937. *Soil Survey Manual*. U.S. Dept. Agric. Misc. Pub., 274, 136 pp.

Mikkelsen, J., Ampe, C., Cools, N., Devos, Y., Dondeyne, S., Oorts, K., Pieters, M. & Langohr, R., 2022. *Veldhandleiding voor het beschrijven van bodems bij archeologisch onderzoek in Vlaanderen*. Handleidingen agentschap Onroerend Erfgoed 29, Brussel, 80 pp.

Schlichting, E., 1973. Pseudogleye und Gleye - Genese und Nutzung hydromorpher Boden. In: *Pseudogley and Gley* (eds. Schlichting, E. & Schwertmann, U.), 1-6. International Society Soil Science, Trans. Commissions V and VI. Verlag Chemie, Weinheim, Germany.

Soil Survey Staff, 1951. *Soil Survey Manual*. U.S. Dept. Agriculture Handboek No. 18. United States Department of Agriculture, 503 pp.

Tavernier, R., 1950. Bodemkartering in België. *Verslagen over navorsingen van het I.W.O.N.L.*, 4, 9-21.

Tavernier, R. & Maréchal, R., 1958. Carte des associations de sols de la Belgique. *Pedologie*, VIII, 134-182.

Van Ranst, E. & Sys, C., 2000. Eenduidige legende voor de digitale bodemkaart van Vlaanderen (schaal 1/20.000). UniversiteitGent.LaboratoriumvoorBodemkunde, 361 pp. <https://www.dov.vlaanderen.be/page/digitale-bodemkaart-van-het-vlaams-gewest>.

Geraadpleegde website op 10/09/2022

https://poppkad.ugent.be/poppkad_atlaspopp.php

IN DIALOOG MET BODEMS VELDBODEMKUNDE VOOR ARCHEOLOGISCH ONDERZOEK

VOORBEREIDEN EN UITVOEREN VAN AARDKUNDIG ONDERZOEK



AUTEURS : JARI HINSCH MIKKELSEN
CAROLE AMPE
VEERLE VANWESENBEECK
FEMKE GERMONPRÉ

1. Inleiding

In het thema ‘Voorbereiden en uitvoeren van aardkundig onderzoek’ beschrijven we hoe de voorbereiding van het terreinwerk het best verloopt. Vooral er op terrein wordt gegaan, kan er reeds heel wat informatie over de onderzoekslocatie worden verzameld. Zo verschaffen de websites van Databank Ondergrond Vlaanderen en Geopunt Vlaanderen heel wat digitale data over bodem, ondergrond, administratieve aspecten en wettelijke beschermingen (hoofdstuk 2). In hoofdstuk 3 bespreken we het optimaal plannen van het veldwerk en de keuze van het veldmateriaal. Ten slotte geeft hoofdstuk 4 richtlijnen voor het lokaliseren, het oriënteren en het voorbereiden van bodemobservaties, en wordt uitgelegd hoe men op het terrein te werk gaat, hoe men een boring uitvoert en met welk materiaal er het best gewerkt wordt volgens vochtigheid en textuur.

2. Databank Ondergrond Vlaanderen

In deze paragraaf lichten we de belangrijkste geologische en bodemkundige informatiebronnen toe, die beschikbaar zijn op de webtoepassing Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV), en die kunnen gebruikt worden bij het luik bureauonderzoek van een archeologienota. DOV bevat dus veel meer gegevens dan deze die we hieronder kort bespreken.

De beschikbare data kunnen eenvoudig geraadpleegd worden in de DOV-verkenner of in één van de themaverkenners. (www.dov.vlaanderen.be)

2.1. Geologische informatie

De geologische informatie vinden we in het tabblad ‘DOV’, bij ‘Geologie’. Hieronder zijn de meest relevante lagen:

- Neogeen/Paleogeen (Tertiair),
- Quartair.

Twee interessante tools die je kan gebruiken zijn de ‘virtuele boring’ en het ‘virtueel profiel’. De voorbeelden hieronder zijn uitgewerkt voor de locatie Berg, Tongeren, provincie Limburg, België (rode vlag).

Tertiairgeologische kaart

De tertiairgeologische kaart geeft de samenstelling weer van de ondergrond (figuur B1). Het zijn de tertiaire formaties die aan het oppervlak liggen onder het préquartaire erosievlak. Elk kleurvlak stelt een gesteentelichaam voor. De kaartenset geeft eveneens informatie over het reliëf van de top van de tertiaire afzettingen (laag ‘tertiair insohyps top’). De tertiairgeologische kaarten werden oorspronkelijk opgesteld op een schaal 1/50.000. Voor elk kaartblad is er een toelichtingenboekje beschikbaar.

Op de website kan je de stratigrafische tabel voor het Neogeen en Paleogeen van Vlaanderen terugvinden. Deze tabel geeft volgens de meest recente stratigrafie, het voornaamste lithologische kenmerk van elke laag. Bijvoorbeeld voor de figuur hieronder kunnen we afleiden dat de Formatie van Borgloon tot de groep van Tongeren behoort, dateert van het Onder-Oligoceen en voornamelijk uit zand bestaat.

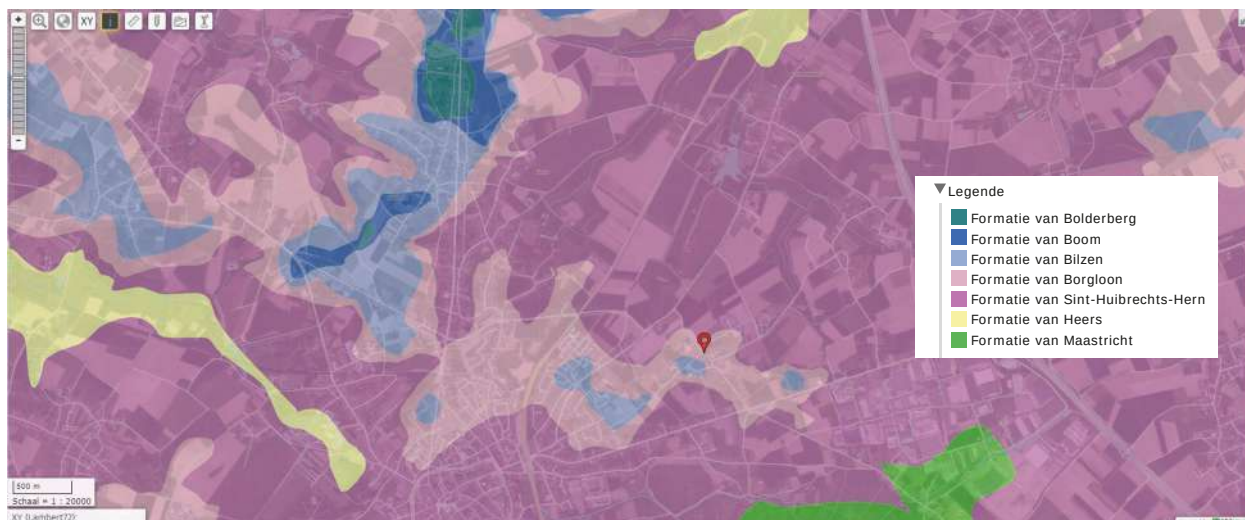


Fig. B1: Tertiairgeologische kaart ter hoogte van het gebied Berg, Tongeren. (© DOV).

Quartairgeologische profieltypekaart
(1/200.000)

Iedere karteereenheid van de quartairgeologische profieltypekaart is genetisch en chronostratigrafisch gedefinieerd (figuur B2). Een profieltype is bepaald aan de hand van een welomschreven opeenvolging van de karteereenheden. Er is gekozen voor een eenvoudige beschrijving hiervan, omdat deze overzichtskaart in eerste instantie voor een niet-geoloog bestemd is. De karteereenheden zijn bijgevolg ge-

definieerd aan de hand van de genese en de ouderdom van de afzettingen. Op basis van de genese worden vier groepen onderscheiden, namelijk fluviatiele afzettingen (F), eolische afzettingen (E), getijdenafzettingen (G) en hellingsafzettingen (H).

Bij het vak 'Resultaten voor doorprik' kan je meer uitleg over het aangeklikte type en de uitgebreide legende aanklikken (figuur B3).



Fig. B2: Uitsnede uit de quartairgeologische profieltypekaart, schaal 1/200.000, ter hoogte van Berg, Tongeren. (© DOV).

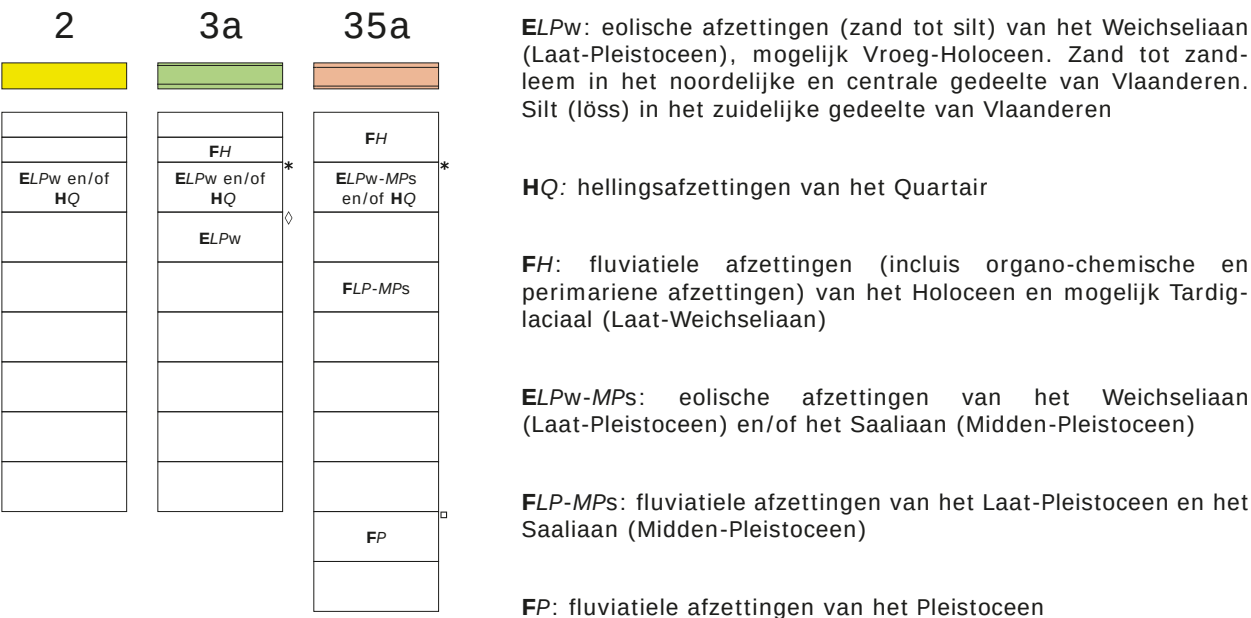


Fig. B3: Voorbeeld van de (vereenvoudigde) legende van de quartairgeologische profieltypekaart (© DOV).

Quartairgeologische kaart – Samengestelde quartairprofieltypekaart (1/50.000)

Deze kaart geeft een beeld van de quartaire profieltypes die in Vlaanderen voorkomen (figuur B4) en is samengesteld op basis van de individuele quartairgeologische profieltypekaarten per kaartblad op schaal 1/50.000. Elke individuele kaart per kaartblad geeft de opeenvolging van de meest recente afzettingen weer. Deze afzettingen zijn eolisch, fluviatiel, getijdenafzettingen of hellingsafzettingen.

De vlakken van de quartairgeologische kaart geven de zones weer waar gelijkaardige successies van specifieke quartaire lagen (profieltypes) voorkomen. De legende van deze kaart kan opgeroepen worden door de laag ‘Samengestelde quartairprofieltypekaart Vlaanderen (1/50.000) – gevectoriseerd’ aan te klikken.

Over de dikte van de verschillende samenstellende lagen van een profieltype moeten vooral de aanvullende isohypsen- en isopachenkaarten en de aanvullende teksten per kaartblad aanwijzingen geven. De quartaire afzettingen in Vlaanderen zijn lateraal en verticaal heterogeen en variëren erg in dikte. De dikte van de quartaire afzettingen kan afgelezen worden van de laag ‘quartair isopachen quartairgeologische profieltypekartering (1/50.000)’.

Per kaartblad kan ook het toelichtingenboekje en de oorspronkelijke kaart gedownload worden via de laag ‘Projectgegevens Quartairgeologische Profieltypekartering (1/50.000)’. Dit boekje verschaft heel wat informatie over de quartairgeologische opbouw, de diktekaart van het Quartair, de profieltypekaart, evenals informatie aangaande oppervlakedelfstoffen en hydrogeologie.



Fig. B4: Uitsnede uit de samengestelde quartairprofieltypekaart, schaal 1/200.000, ter hoogte van Berg, Tongeren. (© DOV).

Virtuele boring en virtuele profielen

 In de DOV-verkenner kan je de tool ‘virtuele boring’ selecteren en vervolgens klikken op de gewenste locatie (figuur B5). In het vak ‘virtuele boring’ zie je nu het bodemtype en de (hydro)geologische lagenopbouw van de ondergrond. Op elk van de segmenten van het geologisch profiel kan je verder doorklikken om meer informatie te bekomen van de geselecteerde laag.

 De tool ‘virtueel profiel’ is het logische vervolg van de virtuele boring en biedt de mogelijkheid om een dwarsdoorsnede van de Vlaamse ondergrond te maken, op een locatie naar keuze, door simpelweg een lijn te trekken in de DOV-verkenner. Via de

profielen kan een goed inzicht verkregen worden in de samenstelling van de ondergrond. Een dwarsdoorsnede toont een 2D beeld langsheen de getekende lijn (figuur B6).

Het is belangrijk te onthouden dat tools zoals de ‘virtuele boring’ en ‘virtueel profiel’ steunen op modellen van de ondergrond. Deze modellen zijn het resultaat van nauwgezet onderzoek gebaseerd op een weelde aan ondergronddata, om een zo waarheidsgetrouw mogelijk beeld te geven van de ondergrond. Er geldt echter altijd dat geologische kaarten en modellen nooit de exacte realiteit in de ondergrond weergeven, waardoor interpretaties gemaakt op basis van modellen nog steeds getoetst moeten worden via boringen.

26 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

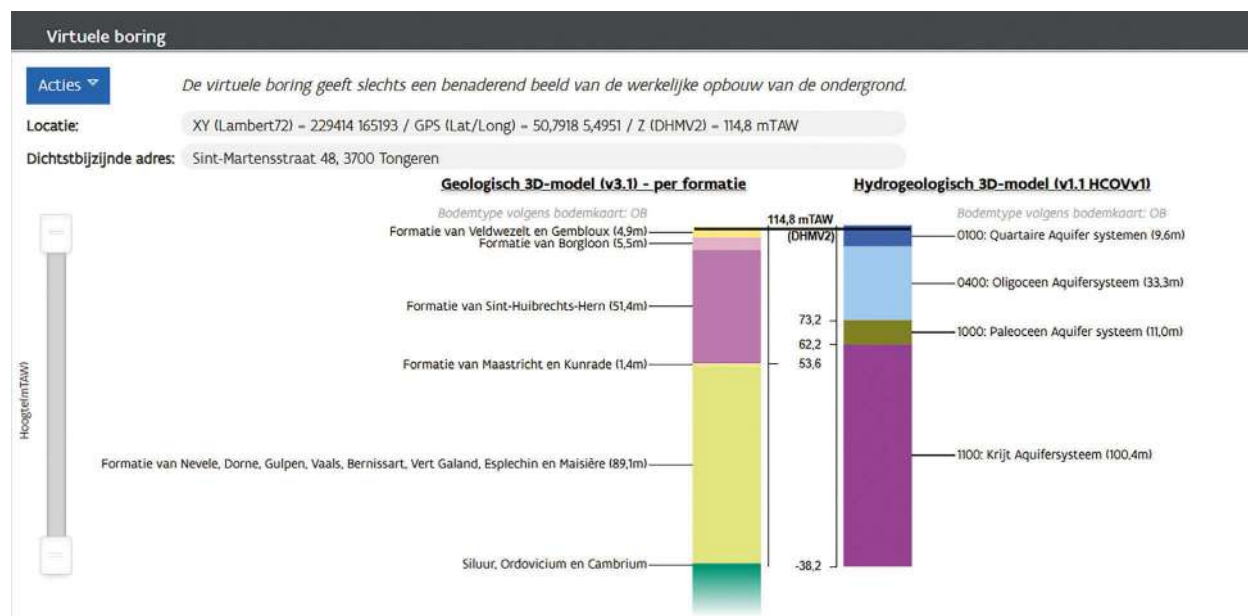


Fig. B5: Virtuele boring ter hoogte van het projectgebied Berg, Tongeren. (© DOV).

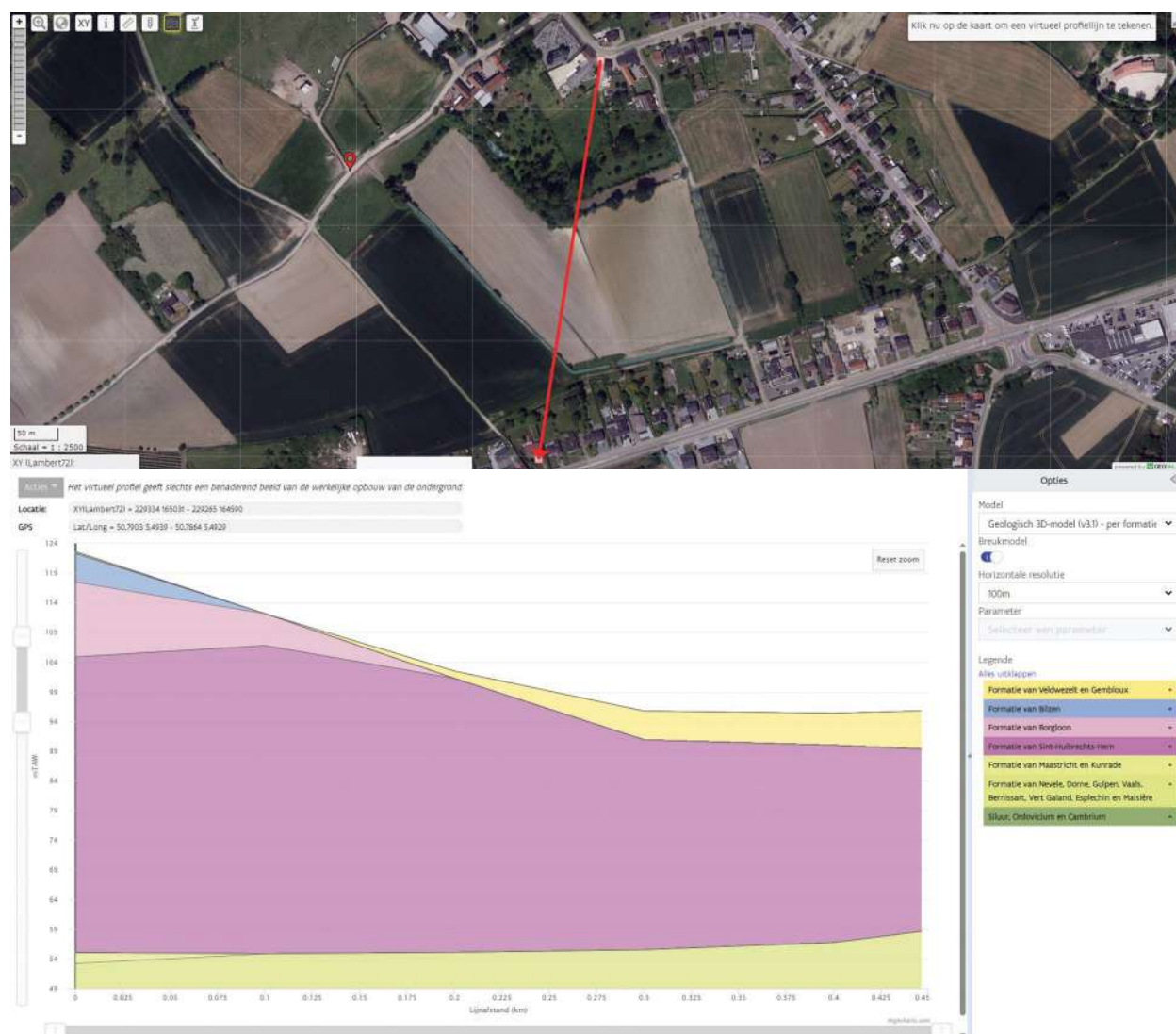


Fig. B6: Virtueel geologisch profiel ter hoogte van het projectgebied Berg, Tongeren. Bij het luik opties is het mogelijk om meer informatie over de geologische formaties te verkrijgen door te klikken op 'Alles uitklappen'. (© DOV).

2.2. Bodemkundige informatie

De belangrijkste bodemkundige informatie voor archeologisch onderzoek vinden we in het tabblad 'DOV', bij 'Bodem'. Hieronder zijn de meest relevante lagen de bodemkaarten met de bodemassociatiekaart, de bodemkaart en de bodemkaart volgens de WRB (World Reference Base for Soil Resources) (IUSS Working Group WRB, 2022).

Bodemassociatiekaart (1/500.000)

De bodemassociatiekaart werd opgemaakt op basis van de systematische opname van de bodemkaart (1/20.000) en gepubliceerd op schaal 1/500.000 in de Atlas van België (Maréchal & Tavernier, 1971 en 1974) (figuur B7). Een bodemassociatie is een inhoudelijke en ruimtelijke groepering van bodems in dezelfde landschapseenheid. Een associatie is gekarakteriseerd door een vrij constante verhouding tussen de oppervlakte ingenomen door een aantal typische bodems. Dikwijls wordt de aard van de associatie aangegeven in termen van een dominante, geassocieerde en geïncorporeerde serie. De bodemassociatiekaart wordt gekenmerkt door een dynamische legende die zich aanpast naargelang het geselecteerde gebied.

Digitale bodemkaart van het Vlaams Gewest (1/20.000)

De Belgische bodemkaart is het resultaat van een intensieve bodemkartering tussen de jaren 1950 tot de jaren 1970. Bij de bodemkartering werd het bodemprofiel bestudeerd tot op 1,25 m diepte.

De Belgische bodemkaart steunt op het Belgische bodemclassificatiesysteem. Het is een morfogenetisch systeem, wat betekent dat het classificatiesysteem morfologische kenmerken gebruikt die tonen welke bodemvormende processen hebben plaatsgegrepen. De basiseenheid is het bodemtype, opgebouwd uit verschillende onderdelen zoals een substraat, textuurklasse, drainageklasse, profielontwikkeling, fasen en varianten (figuur B8). Voor de duin- en polderstreek in West-Vlaanderen is een aparte legende gebruikt die rekening houdt met geomorfologische en lithostratigrafische eenheden. Deze informatie is samengevat in de 'Eenduidige legende voor de bodemkaart van Vlaanderen (Van Ranst & Sys, 2000)'.

Omwillen van de visualisatie is deze dataset op DOV onderverdeeld in 5 kaartlagen: bodemtypes, substraten, fasen, varianten van het moedermateriaal en varianten van de profielontwikkeling. De kaartlaag 'bodemtypes' bevat alle attribuutinfo van de bodemkaart. In het deelscherm 'Resultaten voor de doorprik' bij deze kaartlaag kan je doorklikken op de hyperlink met het bodemtype en opent zich de pop-up 'Toelichting bodemtype' met bovenaan de uitleg van de verschillende onderdelen van het

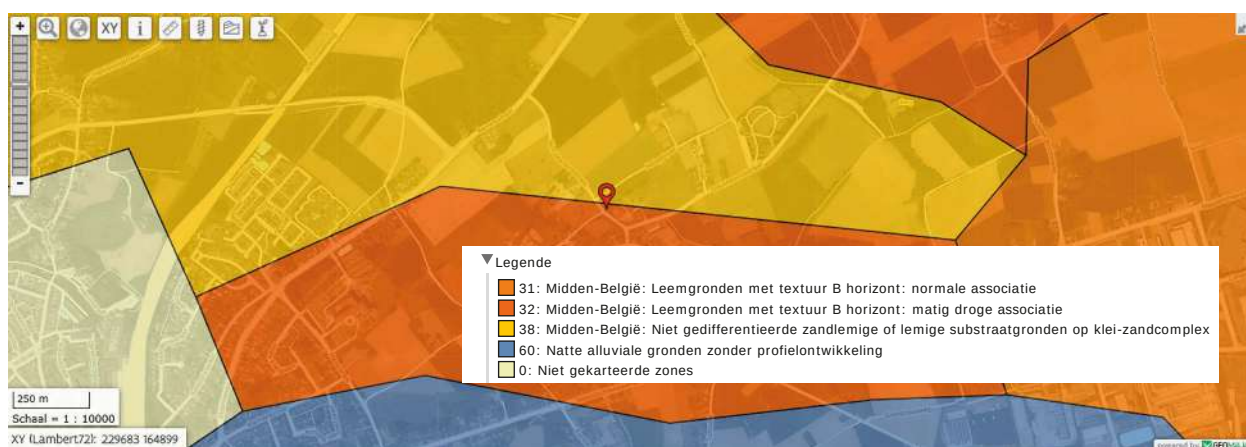


Fig. B7: Uitsnede van de bodemassociatiekaart en legende ter hoogte van Berg, Tongeren. (© DOV).

28 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

bodemtype (figuur B9). In deze pop-up worden ook, waar beschikbaar, voor elk bodemtype de algemene kenmerken en foto's van een representatief bodemprofiel en representatieve landschappen weergegeven. Ten slotte bestaat voor elke locatie de mogelijkheid om de scan van het analoge bodemkaartblad (1/20.000) in pdf-formaat, het toelichtingsboekje en de basiskaarten op schaal 1/5000 op te roepen (figuren B10-B12). Interessant zijn de 'stippenkaarten',

dit zijn de oorspronkelijke basiskaarten op de Popp kaarten van de bodemkartering op schaal 1/5000. Hierop staan de locaties van de originele boorpunten en het bijhorend bodemtype zoals de karteerder het tijdens de bodemkartering genoteerd heeft. Deze stippenkaarten bieden met andere woorden meer gedetailleerde informatie dan de digitale bodemkaart.

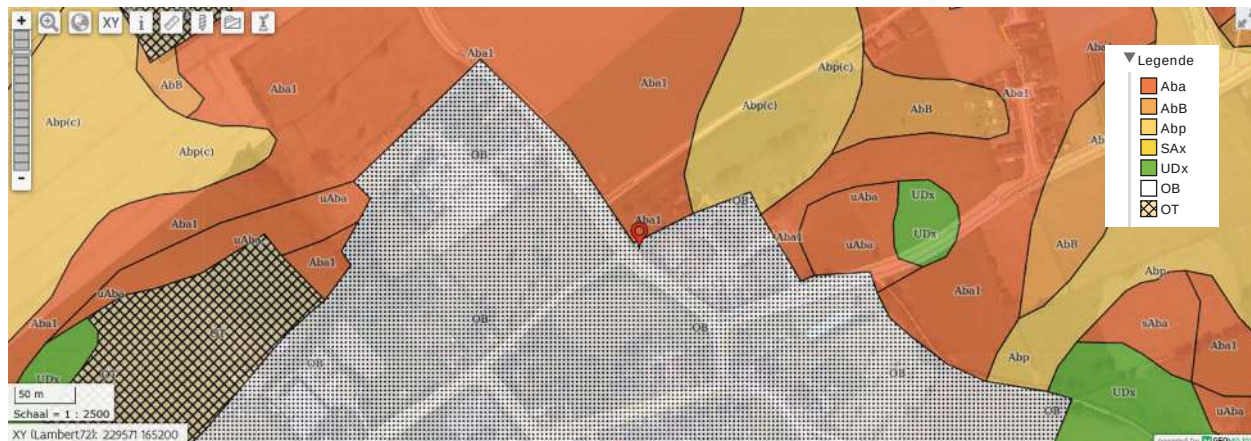


Fig. B8: Uitsnede van de digitale Bodemkaart van het Vlaams Gewest ter hoogte van Berg, Tongeren. (© DOV).

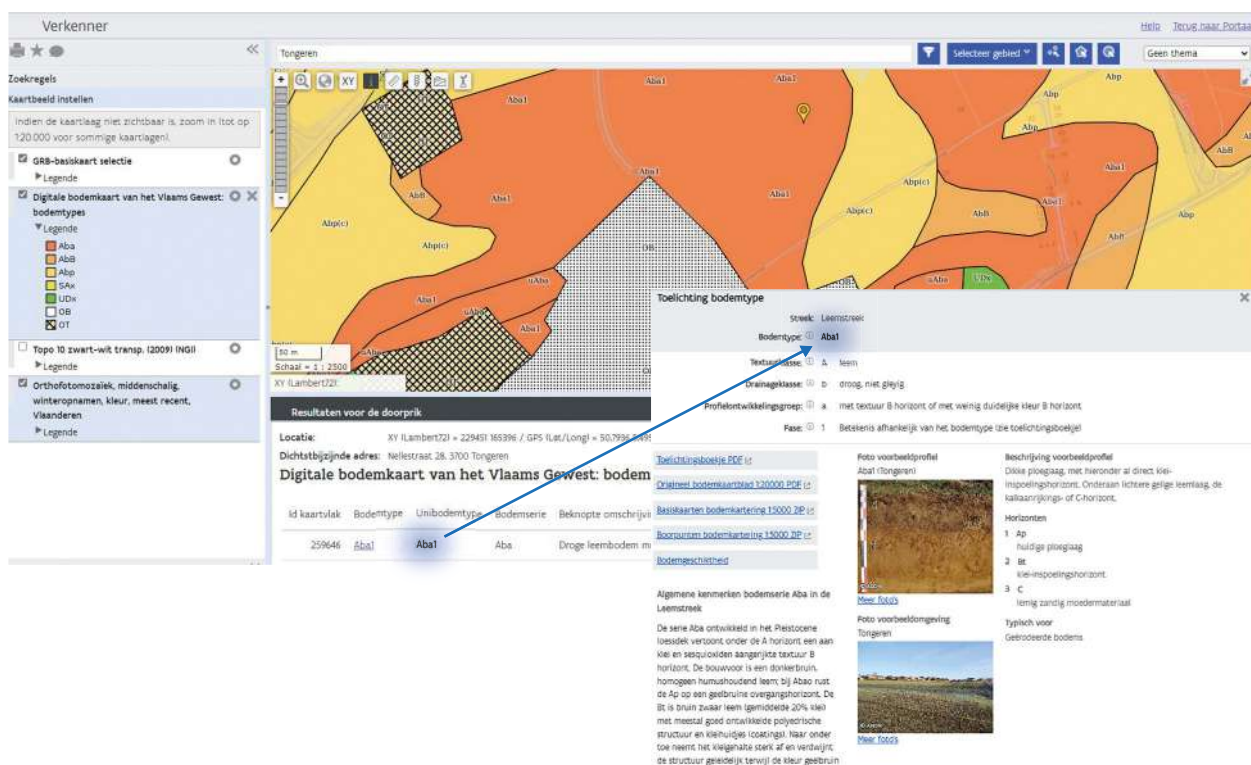


Fig. B9: Digitale bodemkaart van het Vlaams Gewest met de bijhorende pop-up voor een specifiek bodemkaartpolygoon. (© DOV). Inzet: Detail van de pop-up 'Toelichting bodemtype' voor een specifiek bodemkaartpolygoon.

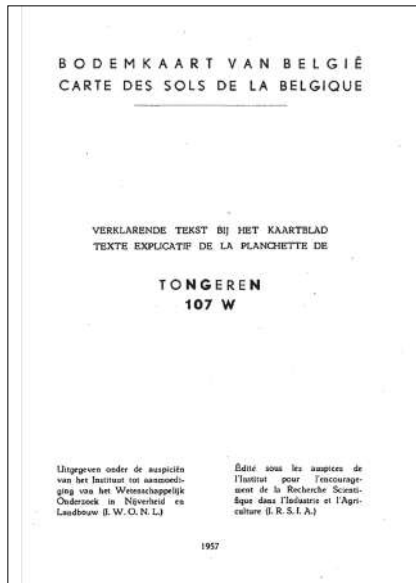


Fig. B10: Detail van de pop-up 'Toelichtingsbodemboekje' voor een specifiek bodemkaartpolygoon. (© DOV).

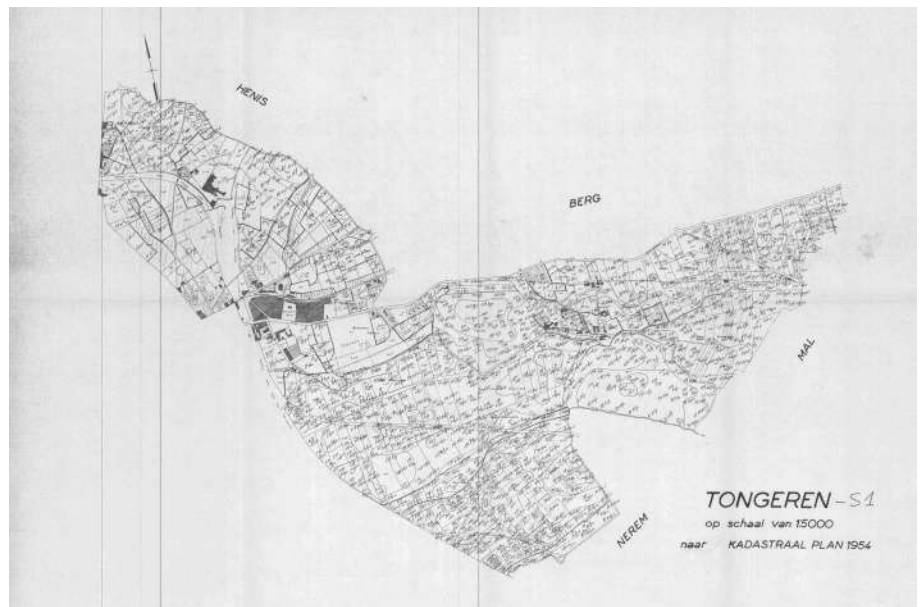


Fig. B11: Stippenkaart met de boorpunten van de bodemkartering 1/5.000 (Tongeren-S01). (© DOV).

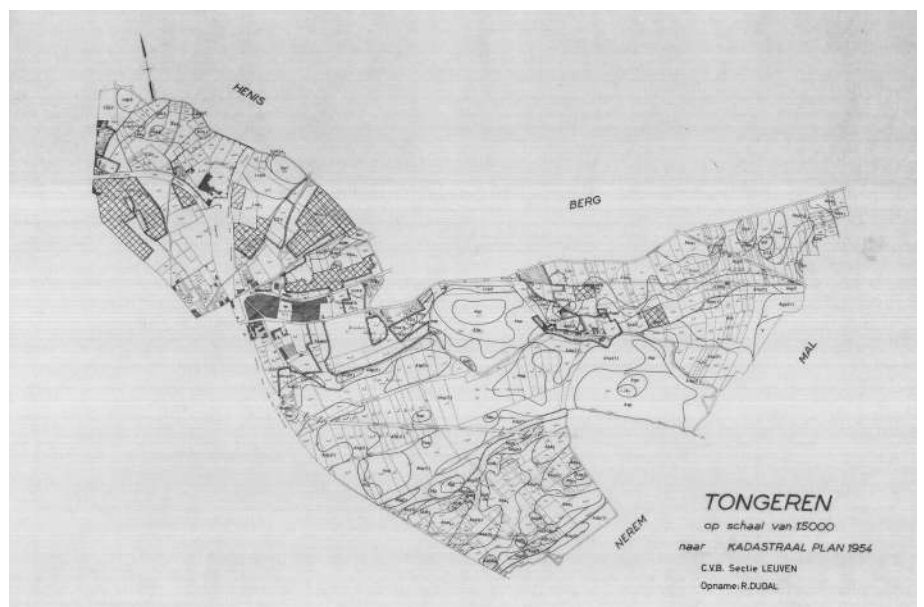


Fig. B12: Basiskaarten met bodempolygonen van de bodemkartering 1/5.000 (Tongeren-S01). (© DOV).

30 – Veldbodembodemkunde voor archeologisch onderzoek

Bodemkaart van België volgens World Reference Base (WRB) (1/40.000)

De groeiende internationale aandacht voor bodemgerelateerde en grensoverschrijdende milieuproblemen vergde een harmonisatie van de diverse nationale classificatiesystemen. In 1998, met aanpassingen in 2006, 2014 en 2022, werd door de *Food and Agricultural Organisation* (FAO) van de Verenigde Naties de 'World Reference Base for Soil Resources' (IUSS Working Group WRB, 2022) gelan-

ceerd als een nieuwe standaard voor bodemclassificatie (figuur B13). WRB wil eveneens als kader fungeren waarbinnen bestaande nationale bodemclassificatiesystemen met elkaar gecorreleerd en geharmoniseerd kunnen worden. Een vertaling van de legende bij de Belgische bodemkaart naar WRB (versie 2014) (Dondeyne, 2014) was dus wenselijk en noodzakelijk.



Fig. B13: Uitsnede van de Bodemkaart van België volgens World Reference Base (WRB) ter hoogte van het gebied Berg, Tongeren. (© DOV).

Erosie- en afstromingskaarten

Potentiële bodemerosiekaart per perceel

In hellende gebieden kan de potentiële erosiekaart interessant zijn. Erosie door water is een proces waarbij bodemdeeltjes door de impact van regendruppels en afstromend water worden losgemaakt en getransporteerd, hetzij laagsgewijs over een

grote oppervlakte, hetzij geconcentreerd in geulen en ravijnen. Deze kaart geeft aan de hand van een klasse-indeling de totale potentiële erosie van een bepaald perceel weer (figuur B14). De totale potentiële erosie werd voor elk perceel opgesteld door middel van computermodellering met een ruimtelijke resolutie van 5 x 5 m. Het model houdt onder meer rekening met het bodemtype, de hellingsleng-

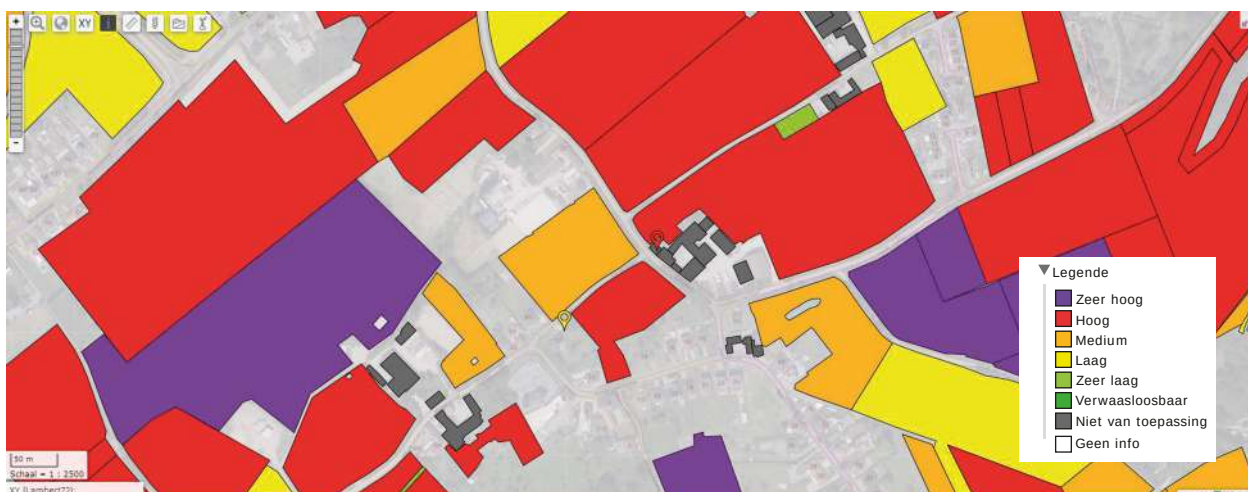


Fig. B14: Potentiële bodemerosiekaart per perceel (2024) in het gebied Berg, Tongeren. (© DOV).

te en de hellingsgraad. De totale potentiële erosie houdt geen rekening met het huidige gewas.

Afstromingskaarten

De afstromingskaart toont de lijnen in het landschap waar het water na een regenbui potentieel geconcentreerd afstroomt, rekening houdend met de topografie en de aanwezige waterlopen. De afstromingskaart van Vlaanderen geeft voor elke pixel van 5 x 5 m weer of er water door de pixel afspoelt en hoe groot (uitgedrukt in ha) het gebied is vanwaar het water afspoelt. De afstromingskaart is gebaseerd op het digitaal hoogtemodel en de Vlaamse hydrografische atlas. De inkleuring geeft per pixel de grootte van het afstroomgebied naar de pixel weer (figuur B15). Er zijn 2 types afstromingskaarten: de blauwe afstromingskaart met enkelvoudige stroomlijnen (al het water in het model stroomt naar de

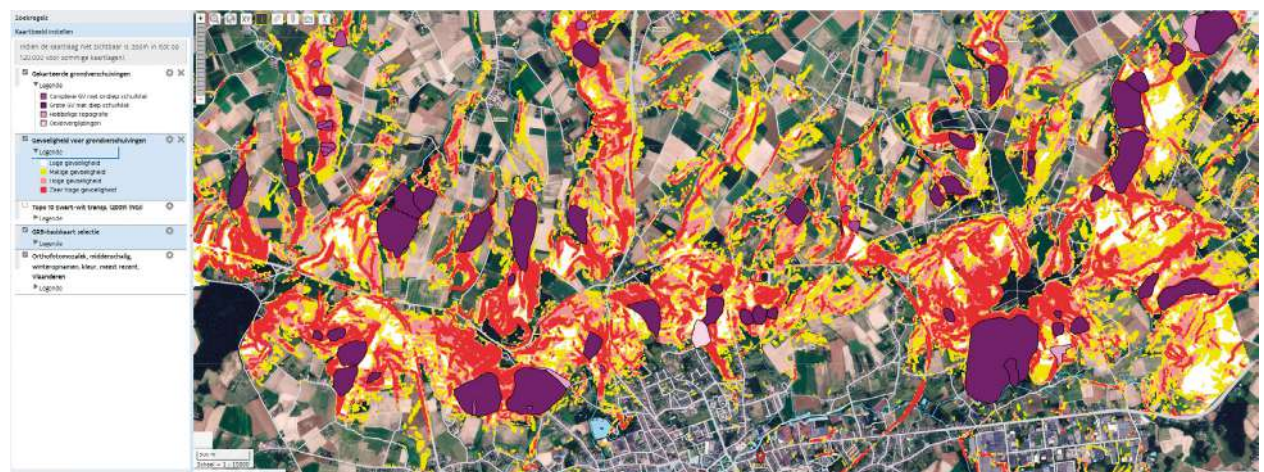
laagst gelegen omliggende pixel) en de fuchsia afstromingskaart met meervoudige stroomlijnen (het water van een pixel stroomt naar meerdere lager gelegen omliggende pixels).

Grondverschuivingen

In Vlaanderen komen grondverschuivingen vooral in de Vlaamse Ardennen voor. Deze regio heeft immers de geologische en topografische kenmerken die typerend zijn voor het ontstaan van grondverschuivingen: smectietrijke kleien (bijvoorbeeld Formatie van Kortrijk – Lid van Aalbeke) onder zandige pakketten (bijvoorbeeld Formatie van Tielt) en zeer steile hellingen. De directe oorzaak van grondverschuivingen is vaak een combinatie van hoge neerslaghoeveelheden en menselijke ingrepen, zoals het aanleggen van een vijver, afgravingen, ophogingen, afdichten van bronnen...



Fig. B15: De afstromingskaart ter hoogte van Berg, Tongeren. De blauwe lijnen stellen de enkelvoudige stroomlijnen voor, de roze de meervoudige stroomlijnen. (© DOV).



Figuur B16: Gekarteerde grondverschuivingen en gevoeligheid voor grondverschuivingen, regio Kwaremont-Ronse, België. (© DOV).

Gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen

De gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen geeft een eerste indicatie van de gevoeligheid voor grondverschuivingen op zeer lokaal niveau in een studiegebied van 2.914 km², dat zowel de Vlaamse Ardennen, het Pajottenland als het West-Vlaams Heuvelland omvat (figuur B16).

Gekarteerde grondverschuivingen

De kaart met gekarteerde grondverschuivingen in de Vlaamse Ardennen bevat een zo volledig mogelijke inventaris van in het landschap waarneembare grondverschuivingen voor hetzelfde gebied van de gevoeligheidskaart voor grondverschuivingen (figuur B16).

3. Veldplanning en materiaal

3.1. Klimatologische data

Klimaatgegevens dienen voorafgaand aan het veldwerk verzameld te worden. Deze gegevens zijn beschikbaar uit de literatuur of van een website, bijvoorbeeld voor het KMI-weerstation te Ukkel, of voor het meest nabij gelegen meteorologisch station voor het projectgebied (zie o.a. Waterinfo.be, meteo.be).

De belangrijkste klimatologische gegevens voor het aardkundig onderzoek zijn:

- neerslag,
- temperatuur,
- windrichting.

KMI-klimaatgegevens

De klimaatnormaal of het langjarige gemiddelde is een gemiddelde waarde van een meteorologisch element voor een periode van 30 jaar. Elke tien jaar berekent het K.M.I. **nieuwe normalen** voor de belangrijkste klimatologische parameters zoals temperatuur, neerslag, zon, vochtigheid, wind en luchtdruk en een aantal indices, zoals bijvoorbeeld het aantal zomerse dagen. De huidige normalen gaan van 1/1/1990 tot 31/12/2020 en vervangen deze van de voorgaande referentieperiode 1981-2010. Voor het weerstation Ukkel kunnen de normalen geraadpleegd worden op: <https://www.meteo.be/nl/klimaat/klimaat-van-belgie/klimaat-normalen-te-ukkel/algemeenheden>.

Het belang van paleoklimaatgegevens

Informatie over vroegere klimaatomstandigheden kan belangrijk zijn, vooral wanneer het gaat om klimaatcondities die invloed hebben gehad op de ontwikkeling van landschap en bodem. Een voorbeeld hiervan zijn bodems die een periode hebben gekend van diepe vorst en zelfs van permafrost (permanent bevroren bodem) tijdens de Jonge Dryas periode, op het einde van het Laatglaciaal. Hierdoor kunnen artefacten bijzondere kenmerken zoals capping vertonen. Een overzicht van de archeologische en geologische perioden staat achteraan dit thema.

Verscheidene klimaatmodellen zijn beschikbaar om een idee te krijgen over de evolutie van het klimaat tijdens korte of lange periodes in het verleden. Het is hierbij belangrijk om te weten welke data gebruikt is voor het opstellen van het model en wat de kwaliteit van deze data is. Zijn de gemiddelden gebaseerd op jaarbasis of maandelijkse data? Welke parameters zijn in het model opgenomen? ...

Een belangrijke klimaatfactor voor de bodemevolutie is de **verhouding tussen neerslag en evapotranspiratie van het ecosysteem**. In geval van een neerslagoverschot percoleert een deel van het water door de bodem. Hierdoor verliest de bodem oplosbare elementen zoals carbonaten en andere plantnutriënten. Zo worden de bodems zuurder en voedselarmer.

Sinds de afzetting van de belangrijkste bodemmoedermaterialen van Vlaanderen, de löss en de dekzanden van het laatste deel van het Pleniglaciaal (ongeveer 30.000 – 15.000 BP), vertoont het paleoklimaat voornamelijk een neerslagoverschot. Hierdoor gebeurt er uitloging van de kalk vanaf het bodemoppervlak en bevindt de ontkalkingsgrens zich tegenwoordig op enkele meters diepte, afhankelijk van de topografische positie. De diepte van de ontkalkingsgrens kan belangrijk zijn voor het archeologisch onderzoek. Dierlijk botmateriaal of inhumaties bijvoorbeeld blijven in het algemeen beter en langer bewaard in bodems met vrije kalk (d.w.z. hoge pH). In ontkalkte, zure bodems (lage pH) daarentegen wordt het botmateriaal snel aangetast tot er niets meer overblijft. Eventueel is er nog een donkere schaduw in de bodem te zien waar de botten initieel begraven werden. Als op een archeologische site een of meerdere bodems kalkrijk zijn, is het belangrijk om na te gaan of het ongestoorde bodemprofiel in de omgeving, het natuurlijk

ke referentieprofiel, eveneens kalk bevat. Wanneer dit niet het geval is, dan is de aanwezige kalk op de site bijna zeker het resultaat van menselijke activiteiten (bemesting, afvalkuilen, kerkhof, bijmenging met kalkmortel...) en dient de oorsprong van de kalk verder onderzocht te worden.

3.2. LiDAR

Laseraltimetrie, of beter gekend LiDAR (Light Detection and Ranging) is een techniek waarbij zeer gedetailleerde digitale hoogtemodellen kunnen opgebouwd worden. Vanuit een vliegtuig, een helikopter of een drone wordt een laserpuls naar het aardoppervlak uitgestuurd. Deze puls wordt gereflecteerd en terug opgevangen door een scanner. Het tijdsinterval tussen het zenden en ontvangen van de gereflecteerde laserpuls wordt omgerekend naar een afstand (Meylemans & Petermans, 2017).

Er zijn twee versies van het digitaal hoogtemodel voor Vlaanderen beschikbaar. De eerste scan, het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen I (DHMV I) dateert van 2004 en bevat gemiddeld één meetpunt per 4 m². De tweede scan, het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen II (DHMV II), opgebouwd tussen 2013 en 2015, bevat gemiddeld 16 meetpunten per m². Dit laat toe om rasters te produceren tot een resolutie van 0,25 m².

Op de website Geopunt (www.geopunt.be) worden door Digitaal Vlaanderen verschillende datasets aangeboden:

- het Digitaal Hoogtemodel van Vlaanderen in rasterformaat met een resolutie van 5m x 5m;
- het Digitaal Terrein Model (DTM: *Digital Terrain model*): maakt alleen gebruik van de pulsen die het grondoppervlak bereiken en toont de hoogte van het kale grondoppervlak;
- het Digitaal Oppervlaktemodel met een grondresolutie van 1 meter (DSM: *Digital Surface Model*): geeft de hoogte van het maaiveld inclusief alle objecten zoals bijvoorbeeld boomkruinen, gebouwen, constructies ...
- het multidirectionele *hillshade* en de *skyview* factor.

Met GIS software is het ook mogelijk om voor een eigen onderzoeksgebied met de ruwe data een LiDAR beeld te creëren. Een zeer handige handleiding is hiervoor door het Agentschap Onroerend Erfgoed uitgewerkt (Meylemans & Petermans, 2017). Een mogelijke toepassing is het opstellen van hoogte-

kaarten in rasterformaat met aangepaste hoogte-intervallen. Deze rasterbeelden kunnen zowel in grijswaarden als met een kleurschaal aangemaakt worden. Aangepaste hillshade kaarten van het maaiveld, opstellen van hoogtelijnenkaarten, 2D en 3D weergave van archeologische relictten, sporen van historisch bodemgebruik en geomorfologische landvormen, zijn maar enkele voorbeelden van de talrijke toepassingen van de LiDAR gegevens.

3.3. Veldplanning

Het lijkt misschien vanzelfsprekend, maar toch gebeurt het dat veldwerk nodeloos moeilijk wordt gemaakt door een gebrek aan goede planning. Achteraf blijkt dat de velddata op een efficiëntere manier hadden kunnen verzameld worden. Een goede veldplanning is daarom cruciaal. Welk type veldwerk wordt voorgeschreven (boringen, bodemprofielen...)? Hoeveel tijd is voorzien? Hoeveel boringen of profielen dienen bestudeerd te worden? Kan de gemiddelde boordiepte al ingeschat worden? Is het terrein gemakkelijk te betreden of zijn er barrières in het landschap, zoals bijvoorbeeld brede grachten, treinsporen, prikkeldraden, een stier ...

De aardkundige werkt in bepaalde fasen van het onderzoek dikwijls onafhankelijk van het archeologieteam en is vaak de eerste die ter plaatse komt om bijvoorbeeld landschapsboringen uit te zetten. Hieronder worden een aantal aspecten aangehaald die indirect of direct een invloed kunnen hebben op een optimale veldcampagne:

- Draag aangepaste kledij en schoenen. Denk aan jouw eigen veiligheid en draag waar dit vereist is, veiligheidskledij zoals veiligheidslaarzen/-schoenen, helm of fluojas. Zorg voor de nodige persoonlijke beschermingsmiddelen, bijvoorbeeld zonnecrème, antimuggenspray. Voorzie een extra pull, regenjas of zonnehoed volgens de weersomstandigheden.
- Zijn rubberlaarzen nodig door wateroverlast?
- Moet er door hoge vegetatie gewandeld worden, voorzie dan aangepaste kledij!
- Is het veldmateriaal in orde en volledig? Werkt alles correct? Is het boorgerief gereinigd?
- Is er een EHBO-koffer ter beschikking op of nabij de site?
- Zijn de elektronische toestellen opgeladen? Heb je extra batterijen mee?

34 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

- Vermijd files op weg naar het veldwerk, vertrek desnoods voor of na het spitsuur; waar kan je gemakkelijk parkeren?
- Bekijk voor het terreinwerk de luchtfoto/orthofo-to van de site, hoe kan het veldwerk best aangepakt worden?
- Wat zegt de bodemkaart over de site zelf en over de bredere omgeving van de site? Heb je het juiste boormateriaal mee volgens de te verwachten texturen en in functie van de opdracht?
- Wat is de geomorfologische context van de site?
- Heb je een uitprint van de site mee, al dan niet met de locaties van de observatiepunten?
- Is de eigenaar en/of landgebruiker vooraf geïnformeerd? Neem de contactgegevens mee. Voorzie een uitprint waarin de toestemming wordt gegeven van de eigenaar/projectontwikkelaar om het veldwerk uit te voeren. Als het gaat om weides vraag of de dieren ergens anders kunnen grazen tijdens het veldwerk.
- **Vouwmeter** (figuren B19, B20): in de handel zijn er dubbelkleurige vouwmeters te verkrijgen die het grote voordeel hebben dat de diepte-intervallen gemakkelijker afleesbaar zijn op de foto's. Geel-witte dubbelkleurige meters hebben wel het nadeel dat ze op foto vaak niet het gewenste contrast geven, dit is niet het geval met rood-witte meters. Helaas zijn beide modellen gemaakt van hout en verslijten ze veel sneller bij langdurige veldperiodes in natte omstandigheden. Bij nat weer of bij booronderzoeken wordt er bij voorkeur gebruik gemaakt van plastic vouwmeters. Ze zijn zeer duurzaam en gemakkelijk afwasbaar. De gele plastic vouwmeters zijn te verkiezen boven de witte, omdat ze wanneer ze nat zijn, ze op foto's minder licht reflecteren dan de witte.
 - Neem bij een booronderzoek **minstens** twee vouwmeters mee, één om naast het opgeboord materiaal te leggen en één om de boordiepte regelmatig te controleren.
 - » Ken jouw boormateriaal: van een combi-boor is de kop 18 cm lang (figuur B20), de onderkant van de sluitbus zit op 50 cm, de bovenkant op 70 cm. De kleine knop staat op 100 cm en de onderkant van het handvat op 120 cm. Op deze manier weet je altijd hoe diep de boring is. Eventueel kan je rond de boor met tape bijkomende dieptes aanduiden.
 - Bij een proefsleuvenonderzoek of een opgraving waar er soms brede bodemprofielen worden onderzocht, zijn 4 tot 6 vouwmeters aanbevolen. Per lopende meter profiel wordt dan verticaal een vouwmeter geplaatst (figuur B21).
 - » Bij complexe bodemprofielen kan als hulpmiddel een raster van 50 x 50 cm aangeduid worden met een truweel of met een dunne koord (figuur B22).
 - Als er meerdere veldteams zijn, kunnen bijvoorbeeld de vouwmeters (en de rest van het veldmateriaal) voorzien worden van gekleurde plakband, één kleur per team, dit beperkt het verlies van veldmateriaal.

3.4. Veldmateriaal

Het veldmateriaal dient afgestemd te worden op het type onderzoek, de bodemgesteldheid, het weer enzovoort. Hieronder volgen enkele aanbevelingen.

Basisveldmateriaal

- **Schop** (figuren B17, B18), vorm en type volgens persoonlijke voorkeur, eventueel recht geslepen en scherp gemaakt om bodemprofielen perfect leesbaar te maken en om kleinere wortels te kunnen doorsnijden.
- **Spade** (figuur B17), belangrijk is een stevige spade die grotere boomwortels kan doorhakken of die gecementeerde of compacte bodemhorizonten zoals een fragipan kan doorbreken.
- **Truweel** (figuur B17), een archeologisch truweel is te klein voor bodemonderzoek. Beter is een kat-tentongtruweel dat bij elke doe-het-zelf zaak kan aangekocht worden. Denk eraan dat modellen gemaakt van roestvrij staal geen roestkleur achterlaten op de bodemwand. De zijkanen van het truweel kunnen geslepen worden met een slijpschijf of een metaalvrijl. Hierdoor kan de bodemwand schoongemaakt worden voor kwalitatieve observaties en foto's.
 - Overweeg om het handvat van het truweel te herschilderen in een felle kleur. Hierdoor is het truweel gemakkelijker terug te vinden bij verlies.
- **Meetlint** (figuur B19): er bestaan ook meetlinten gemaakt van vinyl, 60 mm breed en 2 m lang. Dit model wordt te koop aangeboden bij gespecialiseerde (online) winkels. Op foto's geeft het meetlint een duidelijk leesbaar resultaat.
- **Munsell kleurenkaart** (figuren B23, B24) (zie § 3.5): koop een model dat afwasbaar is en van een bekend merk met geijkte kleuren.

- **Mes:** bij voorkeur met een recht blad van 10-15 cm lang. Een oud keukenmes kan gebruikt worden zolang het blad stevig is. Een kleiner mes type steakmes is uitstekend voor het uitzagen van bodemstalen voor micromorfologie of voor pollenbakken. Hiervoor kunnen ook plamuurmessen gebruikt worden. Een kwalitatief breekmes kan ook handig zijn.
- **Verdund zoutzuur:** HCl 10 % in klein druppelflesje.
- **Waterstofperoxide:** H_2O_2 30 % in klein druppelflesje. Druppelflesjes kunnen aangekocht worden bij de apotheker (figuur B25).
- **Plastic zeil:** uniforme kleur, bij voorkeur mat en relatief dik om het boorprofiel uit te leggen (figuur B25).
- Kompas.
- Kleine container/bidon met water en vod (figuur B25).
- Stevige emmer.



FG

Fig. B17-B20: Het belangrijkste veldbodemmateriaal. Fig. B17: Schop, schop recht geslepen, spade, Hongaarse spade, truweel. Fig. B18: detail van de schop met of zonder recht geslepen einde. Fig. B19: Meetlint en vouwmeter. Fig. B20: De combiboorkop is 18 cm lang.

36 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



Fig. B21: Brede bodemprofielwand opgedeeld per twee meter. Arendstraat, Brugge, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. B22: Brede bodemprofielwand, opgedeeld in vierkanten van 50 cm. Waterput, Lier, provincie Antwerpen, België. (Bourgeois *et al.*, 2014; Cryns *et al.*, 2014).



Fig. B23-B24: Verschillende versies van het Munsell kleurkaartenboek.



FG



Fig. B25: Druppelflesje met verdund HCl 10 %, druppelflesje met H_2O_2 30 %, markeerstift, ring voor het bepalen van schijnbaar soortelijk gewicht, vod, plastic zeil en bidon met water, 5 l bidons van HCl 23 % en H_2O_2 30 %.



Fig. B26: Schrapers met of zonder afgeronde randen.

◀ Fig. B28: Veldschaar, felgekleurd koord, veldhandlens x10, zachte borstel.

Fig. B27: De situering van de boring. Een parasol kan ook handig zijn bij regen, maar is vooral nuttig om schaduw te maken. Kluisbergen, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Optioneel veldmateriaal

- **Schraper** (figuur B26): een schraper bestaat uit een blad en een houder met steel. Er zijn twee modellen, de bietenhak en de beugelhak. Aan de beugel kan een korte (30 cm) of lange steel (150 cm) vastgemaakt worden of zelfs een telescopische steel (tot 500 cm). Het gebruik van een lange of telescopische steel is vooral interessant voor het schoonmaken van hoge profielwanden in bijvoorbeeld groeven. Men kan de twee uiteinden van het schraperblad afronden met een slijpschijf of een vijl. Hierdoor kan gemakkelijker een bodemwand afgewerkt worden voor kwalitatief betere foto's zonder zichtbare schraapranden.
- **Rolmeter**: de rolmeter kan in sommige gevallen handig zijn, bijvoorbeeld bij het uitzetten van een grid op een grote bodemwand, of in situaties waar een gps-toestel niet kan gebruikt worden of niet beschikbaar is. De lengtes van een rolmeter gaan van 10 m tot zeker 60 m. Kies een model dat tegen vocht en modder kan, bij voorkeur een model waar het opgerolde lint nog zichtbaar is, zodat vuil gemakkelijker kan worden afgewassen.
- **Parasol/paraplu** (figuur B27): een parasol is doorgaans groter dan een paraplu. Als vuistregel geldt hoe groter hoe beter, maar bij een booronderzoek waar grotere afstanden moeten afgelegd worden, is een paraplu toch aan te raden. Bij het aanschaffen van een parasol/paraplu, kies je best voor een uniform gekleurd en weinig lichtdoorlatend model. Er bestaan parasols met een spit om ze gemakkelijk in de grond te steken. Kies modellen die afwasbaar zijn. Parasols gebruikt door hengelaars, zijn gewoonlijk van een stevige kwaliteit.
- **Schaar** (figuur B28): in bodems met veel wortelgroei van struiken of grassen is het soms moeilijk om de bodem goed in beeld te krijgen. Met een snoeischaar kunnen de fijnere wortels gemakkelijk afgeknipt worden.
- **Nagels en koord** (figuur B28): bij complexe bodems of sporen kan bijvoorbeeld een grid afgespannen worden met behulp van nagels en dun (neongeel) nylonkoord. Een grid van 50 x 50 cm geeft veel steun bij het verder intekenen, beschrijven en fotograferen van de bodem.
 - Er bestaan kleine waterpassen die men aan het koord kan hangen om zo nauwkeurig mogelijk te kunnen werken.
 - De nagels kunnen in een fluo kleur geverfd worden.

– Kleine nagels kunnen ook helpen om snel bepaalde bodemkenmerken zoals wormgangen te tellen op een bepaalde oppervlakte.

- **Handlens** (figuur B28): sommige bodemkenmerken zijn nauwelijks zichtbaar met het blote oog, bijvoorbeeld kleimigratie of secundaire kalkafzettingen. Een handlens kan daarbij helpen. De handlens heeft typisch een vergroting van x 10.
- **Zachte borstel** (figuur B28): voor optimale foto's is het borstelen van bijvoorbeeld (bak)steenoppervlaktes aan te raden. Gebruik hiervoor een kleine 3-5 cm brede verfborstel.
- **Stevige borstel**: Om het veldmateriaal na het booronderzoek te kunnen schoonmaken in het veld, is een stevige borstel nodig.

Persoonlijk gerief

- **Krijtbord/whiteboard/tablet...**: een bord gemakkelijk in gebruik primeert. Het bord moet niet te groot zijn en gemakkelijk af te kuisen. Voorzie een voldoende voorraad van krijt of markers.
- **Schrijfgerief**: potlood, pen, permanente markerstift, notaboek, invulbladen, tablet, ...
- **Handdoek/vod**: klein, bijvoorbeeld 30 x 50 cm om je handen af te vegen tijdens het werken, vooral wanneer je de Munsell kleurkaart gebruikt, maar ook voor textuurmetingen volgens de vingermethode moeten de vingers proper zijn.

Verpakkingsmateriaal voor staalname

- De materiaalkeuzes voor het bemonsteren van bodemstalen zijn enorm. Hier wordt enkel advies gegeven. Andere keuzes kunnen even goed zijn (zie ook §4.3 staalnamestrategie).
- Plastic zakken voor het bewaren van bodemstalen voor laboratoriumanalyses. Hiervoor is geen ongestoord staal nodig en kan het staal bewaard worden in een plastic zak. Afsluitbare zakken met een schrijfveld worden aanbevolen, zodat de stalen gemakkelijk kunnen gelabeld worden. Wanneer na het afronden van de velddag alle stalen geïnventariseerd worden, is het belangrijk om elk staal van een individueel staalkaartje te voorzien. Op de staallijst wordt ingevuld voor welke doeleinde het staal is genomen en eventueel welke analyses er moeten gebeuren. Een rol plastic zakjes wordt altijd meegenomen ook daar waar normaal gezien geen stalen zullen genomen worden, misschien wordt er toch iets speciaals ontdekt.
- Plastic dozen: de grootte, de vorm hangen af van het doel van de bemonstering. Voor micromorfologie is een rechthoekig 'saladebakje' van 250 ml

perfect van grootte (figuur B29). Voor grotere stalen kunnen grotere bakjes gebruikt worden. In uitzonderlijke gevallen (openwrijfbaar of hard indien droog; stenig...) kan het nodig zijn om de stalen met plaasterstrips te verstevigen.

- **Staalnamebakje:** door een bakje te gebruiken bij de staalname voor bodemanalysen kan het volledige staal in één keer genomen worden en kan eventuele contaminatie van het staal gemakkelijk verwijderd worden vooraleer het staal in het plastic zakje wordt gedaan (figuur B29).
- **Staalkaartjes:** een bodemstaal moet steeds vergezeld zijn van een staalkaartje (cfr. Code van Goede Praktijk voor de vereisten in verband met staalkaartjes) (Belgisch Staatsblad, 5/4/2019, 2019011583: 33748-33965). De staalcode moet uniek zijn zodat er geen twijfel kan ontstaan over waar het staal genomen werd (figuur B30). Bijkomend kan de informatie van het staalkaartje ook aangebracht worden op het recipiënt.



FG

Fig. B29: Staalnamebakje, Kubienabox, rechthoekig saladebakje.

SITE		AFKORTING		CODE	DATUM	
SLEUF	SPOOR	LA	VONDST NR			
INHOUD / OPMERKING / COÖRDINATEN / HOOGTE TAW			AFWIJTJE / SOORT SPOOR / MD			

FG

Fig. B30: Voorbeeld staalkaart.

3.5. Manuele grondboren en hun bodemgeschiktheid

Een handboor voor manuele boringen bestaat uit een bovenstuk (T-stuk), een middenstuk en een onderstuk, of beter gekend een handvat, een verlengstuk en een boorkop.

Een eenvoudige handboor is de ééndelige boor. Hoewel een ééndelige boor lichter is, is deze voor archeologische doeleinden minder geschikt, omdat er geen mogelijkheid is om de boorkop te vervangen of om de handboor te verlengen (figuur B31). Een ééndelige boor moet dus worden gezien als een aanvulling op het boorgerief.

Voor meerdelige boren bestaan er stukken met een conische draadverbinding, met een vierkant clipsysteem of met een bajonetaansluiting (figuren B31, B32). De conische draadverbinding en het vierkant clipsysteem zijn het meest duurzaam, maar het samenstellen van de handboor (lengte, type boorkop) gebeurt het best in het atelier met behulp van een bankschroef en een Zweedse sleutel. Voor archeologische booronderzoeken is boormateriaal met een bajonetaansluiting daarom aan te raden. Het vervangen van boorkop of verlengen van de boor kan snel en efficiënt in het veld gebeuren en dit zonder extra hulpmiddelen, op eventueel een kleine stevige handborstel en een fles water na. De verschillende verbindingsmethoden, conische draadverbinding, vierkant clipsysteem en bajonetaansluiting, zijn niet met elkaar te combineren.

Bij een booronderzoek dienen alle boringen tot minstens 30 cm in het moedermateriaal of substraat geboord te worden. Met een boorkop aangesloten op een handvat kan een boring tot 120 cm diepte uitgevoerd worden. Bij diepere boringen wordt de boor telkens verlengd met een verlengstang van 100 cm. Met sluitbussen worden verbindingen gemaakt tussen het handvat, de verlengstang en de boorkop.

Er zijn verschillende types van grondboren beschikbaar (figuur B33), ze hebben allemaal hun specifieke eigenschappen. De meest gangbare boorkoppen bestaan in verschillende diameters. Standaard is de Edelmanboor met een combiboorkop van 7 cm diameter, maar ze bestaan ook in grotere of kleinere diameters (figuur B34). De belangrijkste boorkop-types voor booronderzoek in Vlaanderen worden hierna overlopen.

Een boorkop voor elk bodemtype (figuur B33)

In deze paragraaf volgen enkele aanbevelingen vanuit de ervaringen van de auteurs. De individuele aardkundige of archeoloog kan een andere voorkeur hebben.

- Edelmanboor: er zijn 4 types van deze boor:
 - **Combiboor**: is bij uitstek een allround boorkop die kan gebruikt worden in bijna alle bodemtypes, hoewel dit niet altijd de meest optimale keuze is. Deze kop hoort standaard bij het boormateriaal, zelfs al lijkt het niet relevant voor een bepaald booronderzoek. Gebruik deze boorkop in alle bodems zonder speciale eigenschappen zoals de aanwezigheid van grote hoeveelheden stenen, zuivere zandbodems, een hoog kleigehalte, onrijpe of waterverzadigde bodems.
 - De **zandboor**: heeft bredere bladen dan de combiboor zodat het materiaal niet te snel uit de boor valt. Dit laat toe om te boren in zandbodems met weinig of geen cohesie. De zandboor kan bijvoorbeeld gebruikt worden bij kust- en landduinboringen of bij droge humusarme zandbodems.
 - De **grofzandboor** heeft nog bredere bladen dan de zandboor waardoor de kop bijna volledig gesloten is. Dit boortype kan bijvoorbeeld gebruikt worden bij waterverzadigde zandige sedimenten zoals op een zandplaat langs rivieren of in estuariene overstromingsgebieden of bij eerder droog zand (jonge kust- en landduinen) waar het zand anders uit de boorkop zal lopen door gebrek aan structuur.
 - De **kleiboor** biedt minder weerstand bij kleverige bodemmateriële door zijn smallere bladen. Bij zware kleibodems is het relatief gemakkelijk om het opgeboorde materiaal uit de boorkop te snijden met een mes of een spatel.
- **Zuigerboor**: bij waterverzadigde gronden is een zuigerboor de beste keuze. Deze bestaat in de werkzame lengte van 75 cm, 150 cm en 200 cm.
- Een **pulsboor** (figuur B35): om compleet waterverzadigde zandige lagen die bijvoorbeeld dieperliggende sedimenten met andere texturen afdekken, te kunnen overbruggen, biedt een pulsboor gekoppeld aan een verbuizingssysteem een oplossing. Om de pulsboor en het gekoppeld verbuizingssysteem te hanteren, moet je minstens met twee personen zijn. Eens de verbuizing geïnstalleerd is, kan je verder gaan met de andere boortypes.
- De **grindboor** (figuur B33) of steenboor, heeft twee kleine stevige schuine punten die een beetje naar buiten staan ten opzichte van de boorcirkel waardoor kleine stenen en keien naar binnen worden geduwd. Door zijn stevige constructie kunnen grotere baksteenfragmenten en sommige mortelsamenstellingen doorboord worden. Deze boorkop is een waardevolle aanvulling bij archeologische booronderzoeken, zeker in stedelijke context waar de bodem is aangerijkt met antropogeen materiaal zoals baksteenfragmenten, mortel, huisafval, schelpen en organische fragmenten. Daar waar een baksteenfragment van 2-4 cm diameter een combiboor zal doen stoppen, zal er verder kunnen geboord worden met een grindboor.
- De **riversideboor** (figuur B33) is een speciale boor voor bodems vermengd met fijn grind en voor onrijpe sedimenten. Ook bij gecementeerde lagen, bijvoorbeeld een gecementeerde podzol B-horizont, kan deze boorkop net als de grindboor een oplossing bieden. Maar door de gesloten buis kan het uithalen van het boormateriaal zeer moeilijk zijn, zeker bij rijper kleig materiaal.
- De **gutsboor**: bij onrijpe bodems of boringen onder het (grond)waterniveau is een gutsboor de beste en de snelste manier om dieper te geraken (figuur B36). De gutsboren bestaan in lengte van 50 cm en 100 cm en met de diameter van 20 mm tot 70 mm (figuur B37). De 30 mm brede guts wordt sterk aanbevolen aangezien de bredere diameter het bepalen van de horizontbegrenzing aanzienlijk vergemakkelijkt. De 20 mm wordt in de 'Code van goede praktijk' (Belgisch Staatsblad, 5/4/2019, 2019011583: 33748-33965) uitgesloten voor het archeologisch onderzoek. De gutsboor duwt weliswaar het bodemstaal samen, zeker bij onrijpe sedimenten, maar het staal wordt niet gedraaid zoals bij de andere boorkoppen. Er bestaat ook een **gutsboor met verzwaard boorlichaam** en voorzien van **slagkop**. Voor de 30 mm en 70 mm brede guts bestaat er ook de versie die in de grond met een speciale hamer (met nylon kop om de slag op te vangen) kan geklopt worden. In archeologische contexten waar hardere lagen of veel artefacten verwacht worden, kan deze gutsboor goed gebruikt worden.



Fig. B31: Eendelige en tweedelige combiboor.



Fig. B32: Detail van de conische draadverbinding en de bajo-netsluiting.



Fig. B33: Verschillende types van boorkoppen, gaande van links naar rechts: boor voor zachte klei, kleiboor, combiboor, zandboor, grof zandboor, grintboor, riversideboor.



Fig. B35: Pulsboor en verbuizingssysteem om in waterverzadigd zand te kunnen boren. Strand, Mariakerke, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. B34: Boorkoppen kunnen een verschillende diameter hebben, gaande van 7 tot 15 cm.

42 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



Fig. B36: Gutsboor met slagkop, boorkoppen met lengte 100 cm voor een gutsboor met diameter 4, 3 en 2 cm; gutsboor diameter 3 cm met lengte boorkop 50 cm.



Fig. B37: Boorkoppen van een gutsboor met diameter 4 cm (boven), 3 cm (midden), 2 cm (onder).

Een overzicht van het aanbevolen boortype in functie van de bodemvochtigheid en de textuur is te vinden in tabel B1. Dikwijls zullen er bij één boring twee verschillende boorkoppen gebruikt worden, in uitzonderlijke gevallen zelfs drie.

Type handboor	Toepassing in functie van bodemopbouw:				Beschrij- ving boorpro- fiel	Nemen van monsters		Haalbare diepte (m)	Snelheid uitvoer- ing
	Gecon- solideerd gesteente en puin	Klei, silt, veen,...	Zand, grind			Onge- roerd	Anaëro- ob		
			Onver- zadigde zone	Verzadig- de zone					
Handboringen									
Edelman	-	+++	+++	-/+	++	-	-	5	++
Riverside	+++	+	+	-/+	-	-	-	5	++
Grindboor	+++	++	+	-/+	-	-	-	5	++
Gutsboor	-	+++	-	-	+++	++	-	10	+++
Pulsboor	-	-	-	+++	+	-	-	10	++
Steekboor	-	+++	+++	++	+++	+++	++	5	+
Spiraalboor	++	+++	++	-	+	-	-	10	+
Zuigerboor	-	+	-	+++	++	++	++	10	++

Tabel B1: De geschiktheid van de meest courante hand- en mechanische boortypes voor boringen tot max 10 m diepte (Vereenvoudigd volgens Emis, 2024).

Wat zit er in een boorset?

Een standaard handboorset met bajonetverbinding bevat (figuur B38):

- 2 handvatten (bovenstukken),
- 4 tot 6 verlengstangen,
- 6 tot 8 sluitbussen,
- 2 combiboorkoppen,
- 1 grindboorkop,
- 1 gutsboor, diameter 3 cm, lengte 100 cm,

- 2 paar handschoenen,
- 1 draagtas,
- 1 spatel of mes,
- 3 tot 10 stukken zwarte stevige plastic van ongeveer 100 x 120 cm,
- Eventueel borstel en poetsdoekje.

Aanbevolen uitbreiding bij rivier- of polderbodems:

- 1 kleiboorkop,
- 2 gutsboren, diameter 3 cm, lengte 100 cm.



Fig. B38: Standaard handboorset met bajonetverbinding (onder de blauwe draagzak) uitgebreid met een kleiboorkop en twee gutsboren, lengte 100 cm en breedte 3 cm.

3.6. De Munsell kleurenkaart

Verskillende personen kunnen verschillende namen geven aan dezelfde kleur, bijvoorbeeld bruin-rood, donkerbruin, bordeaux ... Voor een precieze communicatie onder collega's is een standaardisatie nodig. Om wereldwijd tot een eenvormige kleurbeschrijving te komen, gebruikt men in de bodemkunde een standaard codificatiesysteem. De keuze is hier gegaan naar de *Munsell Soil Color Charts* (Anonymous, 1954; Simonson, 1993) die ook gebruikt worden in andere natuurwetenschappen zoals in de geologie en de plantkunde (zie thema 'Bodemkleur'). Wat het truweel is voor een archeoloog, is de Munsell kleurenkaart voor elke aardkundige: het hoort bij de basisuitrusting (figuren B23, B24; zie ook thema 'Bodemkleur'). Er zijn verschillende producenten die kleurenkaarten aanbieden. Toch wordt de 'echte' Munsell kleurenkaart sterk aanbevolen omwille van hun kleurstabiliteit tussen verschillende uitgaven en edities. De geplastificeerde uitgave kan een meerwaarde bieden, omdat je het vuil voorzichtig kan wegwassen zonder de kleurchips te beschadigen. Kies zeker een uitgave met de volledige gley kleurkaarten (gley1 en gley2). In het thema 'Bodemkleur' wordt dieper ingegaan op de oorsprong van kleur en kleurvlekken in de bodem, hoe de kleur te meten en de naam van de kleur te bepalen (figuren B39, B40).

3.7. Gebruik van veldtesten

Twee veldtesten zijn relevant bij archeologisch onderzoek: het testen op de aanwezigheid van carbonaten in de bodemmatrix door het toedienen van zoutzuur (HCl) 10 %, en het testen van mangaanoxides door het gebruik van waterstofperoxide (H_2O_2) 30 %. Beide producten kunnen bijvoorbeeld bewaard worden in kleine druppelflesjes (figuur B25).

Veldtest voor de aanwezigheid van kalk

Carbonaten komen voor in de bodem als calciumcarbonaat ($CaCO_3$) en magnesiumcarbonaat ($MgCO_3$). Meestal maakt men geen onderscheid tussen deze twee vormen en spreekt men van 'carbonaten'. Hun aanwezigheid wordt vastgesteld door enkele druppels van een zoutzuuroplossing (10 %) aan het bodemmonster toe te voegen. In elke doehet-zelf zaak kan zoutzuur gekocht worden (figuur B25). Meestal is de concentratie van het product in de handel 23 %. Door toevoeging van 1,3 liter gedemineraliseerd water bij 1,0 liter van HCl 23 %, bekom je een concentratie van 10 %. Gebruik bij het verdunnen een veiligheidsbril en hang niet boven de vrijkomende dampen.

- Gebruik geen concentratie van 23 % in het veld, bij deze concentratie HCl is contact met huid en ogen gevaarlijk. Bewaar de HCl 10 % in een fles die volledig dicht kan en label het flesje correct.
- Tijdens het veldwerk kunnen, met een pipet, de verschillende bodemhorizonten of bodemstalen met enkele druppels van HCl 10 % getest worden op de aanwezigheid van kalk (figuur B41). Is de bodem kalkhoudend, dan zal het materiaal opbruisen door het oplossen van de kalk en het vormen van koolstofdioxide (CO_2). Hoe droger de bodem, hoe beter de reactie zal te zien zijn.

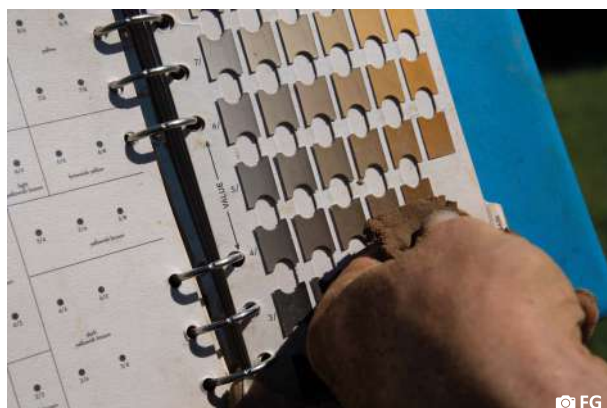


Fig. B39-B40: Gebruik van Munsell kleurenkaart. Een stuk aarde wordt gehouden voor de kleurchips en de beste match gezocht.

- Noteer ook wanneer er geen reactie met HCl is.
- Als de vochtigheid en textuur van de geteste bodemstalen vergelijkbaar zijn, kan de intensiteit van de scheikundige reactie een leidraad zijn voor het gehalte aan kalk in de bodem. De exacte hoeveelheid carbonaten wordt in het laboratorium gemeten.
- Vernieuw regelmatig het product in het recipiënt en reinig het recipiënt daarbij goed.
- Bij onderzoek in een alluviale, fluviatiele of estuariene context, wordt altijd zoutzuur meegebracht. Eveneens bij onderzoek in de leemstreek en stadscontexten hoort zoutzuur bij de standaarduitrusting.

Het testen voor kalk geeft belangrijke informatie. Als er kalk aanwezig is in de bodem, betekent dit dat botmateriaal veel beter bewaard blijft in vergelijking met ontcalcite zure bodems. De kalk aanwezig in de bodemmatrix kan ook een indicatie zijn van menselijke activiteiten zoals bijvoorbeeld bijmenging van mortel. Bekalken van de bodem draagt bij tot een betere pH van het bodemmilieu, het is dus niet uitzonderlijk dat de (huidige) ploeglaag kalkrijk is en de onderliggende horizonten geen kalk bevatten.

Veldtest voor de aanwezigheid van mangaanoxide

Soms kan je in de bodem kleine zwarte vlekken typisch met een diameter van 1-3 mm observeren. Door de kleine diameter is het vaak onmogelijk om na te gaan of er sprake is van mangaanoxide of houtskool. Door enkele druppels waterstofperoxide toe te dienen op de zwarte vlek zal er een reactie komen in de vorm van belletjes zuurstofgas of zelfs witte rook als er sprake is van mangaanoxide. Houtskool is inert en reageert niet met waterstofperoxide. Het waterstofperoxide wordt in een concentratie van 30 % gebruikt. Goed opletten dat het recipiënt goed sluit en dat het product niet op de huid of in de ogen komt. Bij huidcontact moet men de huid onmiddellijk spoelen met water. Het waterstofperoxide kan bijvoorbeeld bewaard worden in een dubbele plastic zak met sluiting (de flesjes gaan gemakkelijk lekken via het rubberetje van de pipet), zodat er geen contact is tussen het product en het overige veldmateriaal. Doordat het product langzaam oxideert is het beter om niet te veel waterstofperoxide in het flesje te doen. Hoe sneller het flesje leeg is, hoe minder snel het rubberetje wordt aangetast.



Fig. B41: Een gutsboorstaal wordt getest op de aanwezigheid van carbonaten door het toedienen van enkele druppels 10 % HCl. Saeftinghe, provincie Oost-Vlaanderen, België.

3.8. Types veldwerk

Het veldwerk voorbereiden is cruciaal voor een efficiënte en optimale werking.

- Wat is het doel van het onderzoek?
- Welke bodemtypes kunnen verwacht worden? Consulteer hiervoor Databank Ondergrond Vlaanderen.
- Is het correcte veldmateriaal ingepakt?
- Is er materiaal voor staalname aanwezig?
- Het is altijd aangeraden om een notitieboek of invoertabellen op papier mee te brengen naast een eventuele veldcomputer.

Controleboringen

Controleboringen hebben tot doel om aan de hand van enkele boringen ($n < 10$) eenvoudige vraagstellingen te beantwoorden. Controleboringen zijn een meerwaarde bij het opstarten van een archeologiedossier, bijvoorbeeld voor het schrijven van een archeologienota al dan niet met uitgesteld traject. De gerichte boringen die in de nota worden opgenomen, kunnen het plan van maatregelen onderbouwen. De Belgische bodemkaart is een bijzonder waardevol document, maar heeft zijn beperkingen: sommige kaartbladen zijn in de jaren '50 van vorige eeuw opgemaakt, waardoor de informatie die uit de kaart kan afgeleid worden niet altijd nog actueel is. Hou er rekening mee dat niet elke bodemkarterder even veel veldervaring had bij het opmaken van de originele bodemkaart en dat er ook fouten zijn gemaakt bij het digitaliseren van de bodemkaart. Alhoewel de Bodemkaart van België zeer gedetailleerd is, met 2 boringen per hectare, is het niet altijd mogelijk om exacte informatie te hebben op perceelsniveau. De kaart is oorspronkelijk opgenomen op een schaal 1/2500 of 1/5000, maar na vereenvoudigingen gepubliceerd op 1/20.000. Het heeft dus geen zin om de (digitale) bodemkaart op te blazen naar bijvoorbeeld een schaal 1/1000. De oorspronkelijke stippenkaarten kunnen wel meer informatie verschaffen. Bovendien blijft een kaart ook slechts een model, een benadering van de werkelijkheid.

Landschappelijke boringen

Landschappelijke boringen (figuren B42, B43) hebben als doel een gebied bodemkundig en geomorfologisch in kaart te brengen (zie ook Van Gils & Meylemans, 2022). De landschapskartering

dient voornamelijk als informatiebron voor het plannen van het verdere archeologische veldwerk en van het programma van maatregelen in het kader van een archeologienota. Soms kunnen deelgebieden of deeltrajecten aan de hand van een landschapskartering vrijgegeven worden als blijkt dat de grond ontgonnen of zodanig diep verstoord is dat de kans op archeologie onbestaande is. Bij twijfel dient verder onderzoek te gebeuren. Bij een boring wordt immers een puntobservatie van 7 cm gedaan en dit gewoonlijk om de 30 m tot 50 m.



Fig. B42: Sfeerfoto van een boorcampagne tijdens de winter in de Oostkustpolders, Knokke, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. B43: Tijdens een boorcampagne in een bos of in een half-open landschap is het niet altijd gemakkelijk om het verband tussen bodem en landschap te leggen. Binnenduinen, Knokke, provincie West-Vlaanderen, België.

Bij een landschapskartering is een duidelijk geformuleerde archeologische vraagstelling uiterst belangrijk. Bij de kartering zal informatie verzameld worden, maar het belangrijkste aspect van het veldwerk is het interpreteren van de landschappelijke en bodemkundige informatie in functie van de archeologische vraagstelling. Dit kan gaan van eenvoudige vragen zoals 'wat is de kans dat er nog archeologische sporen bewaard zijn onder de ploeglaag?', of

meer complexe vragen zoals bijvoorbeeld ‘wat is de invloed van colluviale erosie en sedimentatie in functie van de topografie?’.

Een landschapsbooronderzoek kan op verschillende manieren gebeuren. De meest optimale aanpak is afhankelijk van een reeks factoren, de belangrijkste zijn:

- De grootteorde van het landschapsonderzoek: gaat het om een enkel perceel, of is het een geheel van weides, akkers en natuurgebieden?
- Configuratie van het onderzoek: gaat het om een lijntraject of een aaneengesloten gebied?
- De leesbaarheid van het natuurlijk landschapsreliëf in het landschap?
- De bodemcomplexiteit.
- De historische en recente menselijke impact op de bodemstratigrafie, topografie en landschapsgeomorfologie.

De kennisopbouwende boorstrategie

Bij deze boorstrategie wordt het te boren gebied ter plaatse geanalyseerd. Eventueel wordt eerst rondgewandeld om het projectgebied te verkennen, waarbij de topografie, geomorfologie en vegetatiedek belangrijke aspecten zijn als informatiebron om de variatie in het bodemlandschap te achterhalen. Vervolgens wordt de eerste boring uitgevoerd. Aan de hand van de kennis van de eerste boring wordt de locatie van de tweede boring uitgekozen en zo verder; de overwegingen die achter de keuze van de volgende boorlocaties staan, worden genoteerd. Met voortschrijdende kennis wordt finaal heel het studiegebied in kaart gebracht. Het resultaat is een onregelmatig boorraster waar complexe landschappen of bodemeenheden fijner worden afgeboord en minder complexe of weinig interessante zones minder intensief worden onderzocht.

Deze methode wordt aanbevolen voor kleine booronderzoeken ($n < 20$) waar idealiter dezelfde aardkundige alle boringen beschrijft en interpreteert. Voor bodems waar het natuurlijke reliëf onzichtbaar is, is deze methode minder evident.

De transect boorstrategie met kennisopbouw

Als het projectgebied een relatief homogeen landschap vertoont zonder of eventueel met een flauwe helling, kan gewerkt worden met een of meerdere boortransecten. Met een booronderzoek op een transect worden alle boringen op een min of meer rechte lijn worden uitgevoerd (figuren B44, B45). Bij lange transecten kan, voor een optimale locatie

van de boorpunten in functie van het landschap, een knik in de rechte lijn van het transect gelegd worden. Langs het transect is de afstand tussen de boringen afhankelijk van de bodemcomplexiteit, bodemvariabiliteit en de aanwezigheid van lagen of horizonten die potentieel archeologisch interessant kunnen zijn. Als een boring wijst op verstoring, bijvoorbeeld een windworp, gracht, antropogene structuren, boor dan opnieuw op 1 à 2 m afstand; indien de bodem dan nog steeds verstoord is, wordt nogmaals op 1 à 2 m afstand van de vorige boring een nieuwe boring geplaatst en zo verder. Boringen die om een of andere reden niet lukken, worden ook geregistreerd, zeker wanneer een boring niet veel dieper raakt dan de ploeglaag, omdat een hard object (bijvoorbeeld een fundering) verder boren verhindert.



Fig. B44: Boorraai met verschillende boorpunten zichtbaar. Berg, Tongeren, provincie Limburg, België.



Fig. B45: Voorbeeld van boorraai met vaste afstand tussen de boorpunten. Zeebrugge, provincie West-Vlaanderen, België.

De transect boorstrategie met vaste afstand

Er zijn verschillende redenen om een boortransect met een vaste boorafstand toe te passen (figuur B45): ofwel bestaat het projectgebied uit relatief homogene bodems, ofwel is er weinig reliëf in het landschap zichtbaar, ofwel wordt het onderzoek uitgevoerd door verschillende boorteams. De boorpunten worden op voorhand uitgezet in een GIS-programma en ingelezen in het GPS-systeem, die dan worden uitgezet op het terrein. Bij deze methode kan de aardkundige met meerdere boorteams werken die de locatie van de boorpunten uitzetten en vervolgens de boringen uitvoeren en klaarleggen. De aardkundige moet dan enkel de boringen beschrijven. Het kritisch evalueren van de uitgevoerde boringen is belangrijk. Als er regelmatig in een gracht wordt geboord, verandert dan de afstand tussen de boringen. In de bossen van Vlaanderen werden bijvoorbeeld vroeger dikwijls drainagegrachten ('rabatten') aangelegd met een tussenafstand van 4 tot 6 m. Wanneer bij lijntrajecten, met bijvoorbeeld 50 m tussen de boringen, een boring in een windworp of een gracht terechtkomt is er direct 100 m tussen twee bruikbare boorobservaties, dit is nefast voor de verdere interpretaties. Het is daarom belangrijk dat een tweede of zelfs een derde boring wordt gemaakt op enkele meters afstand en loodrecht op de oriëntatie van de boorraai om zo geen hiaten in de databank te hebben.

De boorstrategie volgens een vast raster

Bij een boorstrategie volgens een vast raster wordt er in een raster van bijvoorbeeld 50 x 50 m geboord, waarbij de boorraaien ten opzichte van elkaar geschrinkt zijn. Wanneer het projectgebied breder is dan 20 m, worden minstens twee boorraaien uitgezet.

Grootschalige booronderzoeken, waar de senior-aardkundige meerdere boorteams moet aansturen, kunnen enkel volgens een vast raster uitgevoerd worden. Bij kleinere onderzoeken is deze methode af te raden net omwille van het gebrek aan flexibiliteit en aanpassingsmogelijkheden als de werkelijkheid er anders uitziet dan de verwachtingen.

Archeologische boringen

Wie denkt aan archeologische boringen, maakt onmiddellijk de link met steentijdonderzoek. In de meeste gevallen is dit ook zo, maar archeologische boringen kunnen ook dienen om bijvoorbeeld ge-

ofysische prospectiegegevens te verifiëren. In dit geval wordt de locatie van de boringen bepaald door de geofysicus.

Verkennde archeologische boringen

Als blijkt uit het bureauonderzoek of het landschapsbooronderzoek dat er horizonten of lagen zijn die potentieel steentijdsites kunnen bevatten, dan wordt een verkennend archeologisch booronderzoek uitgevoerd (figuren B46, B47). Dit booronderzoek wordt uitgevoerd in een vast raster van 10 x 10 m of 10 x 12 m. Hiervoor wordt een boor met een diameter van 12 of 15 cm gebruikt (figuur B34). Bij textuurklasse klei of zware klei mag een boor met diameter van 10 cm aangewend worden om de manuele boringen uitvoerbaar te houden. Het opgeboorde materiaal uit de gewenste horizonten of lagen wordt direct in een staaldoos of emmer overgebracht en afgedekt met een deksel. Bij een archeologische boring wordt een staal genomen en uitgezeefd om na te gaan of het steentijdmateriaal bevat. Een vereenvoudigde boorbeschrijving volstaat om het zeefstaal te kunnen situeren ten opzichte van de bodemstratigrafie. Waar een aantal van de boringen ook bodemkundig beschreven worden, gelden de richtlijnen voor landschappelijke boringen. Indien er geen bodembeschrijvingen nodig zijn, wordt dit volgens de 'Code van goede praktijk' (Belgisch Staatsblad, 5/4/2019, 2019011583: 33748-3396) niet gezien als een aardkundige handeling.

Waarderende archeologische boringen

Het waarderend archeologisch booronderzoek volgt op het verkennend booronderzoek waarbij de dichtheid van de boringen stijgt met een factor vier. In de nabijheid van de boringen die volgens het verkennend booronderzoek archeologisch relevant zijn, worden aanvullende boringen uitgevoerd in een raster van 5 x 5 m of 5 x 6 m. Er wordt bij een waarderend booronderzoek geen boorbeschrijving uitgevoerd. Enkel de staaldiepte en de x- en y-coördinaten zijn belangrijk. Een waarderend archeologisch booronderzoek is volgens de 'Code van goede praktijk' (Belgisch Staatsblad, 5/4/2019, 2019011583: 33748-3396) geen aardkundige handeling.



Fig. B46-B47: Voorbeeld van een verkennend archeologisch booronderzoek met bodemkundige beschrijving en staalname voor archeologisch zeefwerk. Ingelmunster, provincie West-Vlaanderen, België.

Proefputten

Proefputten zijn putten die in specifieke omstandigheden (bijvoorbeeld beperkte ruimte beschikbaar in een stedelijke context...) worden gegraven. Met proefputten bedoelen we dus niet de diepere putten die tijdens een proefsleuvenonderzoek worden gegraven om een volledige horizontsequentie tot in het moedermateriaal te kunnen bekomen. In zeker twee gevallen kunnen proefputten een meerwaarde zijn.

- Proefputten bij steentijdonderzoek: als zones van een projectgebied positief worden getest tijdens het waarderend archeologisch onderzoek, maar de concentratie laag is en/of de bodemkundige context waarin de vondsten werden waargenomen onduidelijk is om een steentijdopgraving direct aan te bevelen, dan kunnen één of meerdere proefputten daarbij helpen. De uitgegraven grond wordt per niveau gezeefd voor artefacten. Steentijdproefputten zijn typisch 100 x 100 cm groot en worden niet beschouwd als een aardkundige handeling (figuren B48-B55).

- Proefputten bij complexe bodems: als bij een booronderzoek de complexiteit van de bodem niet voldoende begrepen is, dan kan een bodemprofiel verheldering brengen. Onder de noemer complexe bodems vallen ook bodems in stedelijke contexten, waar de beschikbare onderzoeksoppervlakte beperkt is of de grond over het algemeen verstoord is op kleine zones na. In stedelijke contexten worden ook soms proefputten tussen de proefsleuven aangelegd, waar oude funderingen of andere ondergrondse structuren het doortrekken van standaard sleuven onmogelijk maken (figuren B56-B59). De grootte van de put wordt bepaald door de omstandigheden en de grootte van de kraanbak.

Tot slot zijn er ook situaties waar het aanleggen van proefsleuven met bodemprofielen niet mogelijk zijn. Hier kunnen manueel gegraven bodemprofielen de enige methode zijn die een observatie in drie dimensies biedt. Voorbeeld hiervan zijn vooronderzoeken in bossen of in natte natuurgebieden of op terreinen die beschermd zijn.

50 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



Fig. B48-B55: Werkwijze voor het graven van kwaliteitsvolle proefputten voor steentijdonderzoek. Fig. B48: De proefput met een oppervlakte van 100 x 100 cm wordt opgedeeld in vier kwadranten van 50 x 50 cm. Fig. B49: Een kwadrant wordt telkens per 10 cm diepte uitgegraven. Fig. B50-B51: Door het horizontaal vlak mooi op te kuisen, is de bodemopbouw in drie dimensies duidelijk zichtbaar. Fig. B52: Op grotere diepte wordt het moeilijker om de put uit te graven en het horizontaal vlak op te kuisen. Fig. B53: Wanneer een proefput niet onmiddellijk weer gedicht wordt, vergeet ze dan niet met lint af te spannen. Fig. B54: Net genoeg plaats voor de bodemkundige beschrijving. Fig. B55: Een van de vier te beschrijven profielwanden. Ingelmunster, provincie West-Vlaanderen, België. (Noens & Mikkelsen, 2012; Bruyninckx, 2017).



Fig. B56-B57: Voorbeeld van een proefputonderzoek in een stadscontext. Nederpolder, Gent, provincie Oost-Vlaanderen, België. Fig. B56: Zicht op de profielputlocatie. Fig. B57: Foto van de linkse profielputwand met de gaten van de staalname voor bodemanalysen (Mikkelsen *et al.*, 2020).



Fig. B58-B59: Complex bodemprofiel in stedelijke context. Maken van een profielput in een zeer beperkte ruimte. Sint-Jacobstraat, Brugge, provincie West-Vlaanderen, België.

Proefsleuven

Bij een proefsleuvenonderzoek legt de archeoloog aan de hand van sleuven, dwarssleuven en kijkvensters een oppervlakte van 12,5 % bloot en dit tot onder de huidige bewerkingslaag, oppervlaktehorizont, colluvium of andere horizont of laag die het zicht op archeologische sporen belemmert (figuren B60-B65). Een dergelijk proefsleuvenonderzoek dient steeds opgevolgd te worden door een aardkundige, waarbij het hoofddoel is om het archeologisch potentieel van de aanwezige lagen en horizonten in te schatten, en aanvullend om het aanwezige bodemlandschap in kaart te brengen.

Een aardkundig onderzoek van een proefsleuven-dossier bestaat uit twee aspecten. Enerzijds is er het bodemprofielonderzoek (referentieprofielen). Wanneer de sleuven worden getrokken, bepaalt de aardkundige waar diepere profielen tot minstens

30 cm in het moedermateriaal (C-horizont) in de sleuf gewenst zijn (figuren B64, B65). Hierbij wordt gestreefd om een zo optimaal mogelijke indruk te krijgen van het bodemlandschap, met de nadruk op de zones binnen het projectgebied waar de bodemopbouw complexer is en/of waar archeologisch interessante lagen of horizonten aanwezig zijn. Anderzijds worden alle sleuven tijdens het veldwerk afgelopen waarbij regelmatig de verticale bodemwand of het horizontale bodemoppervlak wordt opgekuist ter controle. De bedoeling van het aflopen van alle sleuven is om de laterale variatie in de bodemmorfologie, zoals geregistreerd in de referentieprofielen, te begrijpen. Tegelijk kunnen ook sporen op het horizontaal vlak gecontroleerd worden om na te gaan of ze van antropogene of natuurlijke aard zijn.



Fig. B60: Proefsleuven, die 12,5 % van de te onderzoeken site blootleggen. Zeevaartstraat, Brugge, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. B61: Vlakdekkende opgraving waarbij het volledige op te graven proefvlak wordt opengelegd. Zonnebloemweg, Zeebrugge, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. B62: Lange profielwanden worden per lopende meter opgedeeld. Arendstraat, Brugge, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. B63: Profiel tot 30 cm in het moedermateriaal. Zonnebloemweg, Zeebrugge, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. B64-B65: Bodemprofielonderzoek in een proefsleuf waarbij lokaal de sleuf dieper wordt gegraven zodat het moeder materiaal bereikt wordt. Perrestraat, Bierbeek, provincie Vlaams-Brabant, België. (Cryns *et al.*, 2016).



Wanneer de erkend archeoloog, eventueel op advies van het aardkundig onderzoek, besluit dat een vervolgonderzoek nodig zal zijn, dient de aardkundige te bepalen welk aardkundig onderzoek hierbij vereist is. Hierbij wordt niet enkel bijkomend of gedetailleerd bodemonderzoek bedoeld, maar eveneens advies omtrent staalname en natuurwetenschappelijk onderzoek (OSL-dateringen, pollen, zaden en vruchten, meso- of micromorfologie, fysische of chemische bodemanalysen, ...). Een raming van het nodige aantal van elke type onderzoek en het bijhorend budget om het onderzoek te kunnen uitvoeren, vormt een vereist onderdeel van het rapport van de aardkundige.

Opgravingen

Het aardkundige onderzoek bij proefsleuven draait in essentie rond het karakteriseren van de natuurlijke bodemontwikkeling en de menselijke impact op het bodemlandschap. Bij een opgraving ligt de nadruk op de verschillende aardkundige lagen en horizonten en de menselijke impact op een specifieke laag.

Waar bij een proefsleuvenonderzoek het nemen van bodemstalen eerder een uitzondering is, is dit een noodzakelijk onderdeel van een aardkundig onderzoek op een archeologische opgraving. Het soort stalen, het aantal stalen en de laterale en verticale verspreiding van de staalname hangt af van de complexiteit van de aardkundige context en de archeologische sporen. In de mate dat dit mogelijk is, dienen steeds stalen genomen te worden van de *in situ* bodems met de minste antropogene verstoring. Deze stalen dienen als referentie en kunnen vervolgens vergeleken worden met de stalen genomen in de archeologische zones en sporen. Dit laat toe om de antropogene factor op de bodem te kwantificeren.

De onderzochte bodemprofielen zijn in vergelijking met een proefsleuvenonderzoek doorgaans dieper en breder. Het aantal bodemprofielen en het detailniveau van de beschrijving is veel uitgebreider.

Bodemonderzoek in stedelijke contexten

Stedelijke contexten worden vaak gekenmerkt door hun complexe bodemstratigrafie ten gevolge van langdurige en intense occupatie. Daarenboven is deze bodemstratigrafie vaak slechts gedeeltelijk bewaard. Om een meer complete bodemstratigrafie te verkrijgen, is het daarom vaak noodzakelijk verschillende bodemprofielen (hoe klein ook) te bestuderen.

De originele *in situ* bodemontwikkeling is vaak ook zeer fragmentarisch bewaard. Dit betekent dat het originele bodemlandschap moeilijk te achterhalen is. Om dit doel toch te bereiken dient men gegevens, kennis en informatie van nabije sites of vergelijkbare geomorfologische contexten van buiten de stedelijke situatie te extrapoleren. Wanneer de bodemstratigrafie fragmentarisch en incompleet is, vormen meer gespecialiseerde technieken zoals micromorfologie en fysische en chemische bodemanalyses belangrijke tools om de menselijke impact en activiteiten te achterhalen. Toch kunnen in stedelijke contexten soms ook uitzonderlijk goed bewaarde bodemprofielen aangetroffen worden.

4. Veldregistraties: lokalisatie, oriëntatie en voorbereiding van een bodemobservatie

4.1. De boring

De meest praktische werkwijze is het booronderzoek te beginnen met twee boren: een eendelige combiboor waarmee kan geboord worden tot 120 cm diepte en een handvat + verlengstuk + combiboor, waarmee tot 220 cm kan geboord worden. Hierdoor moet de boor pas verlengd worden vanaf boordieptes boven de 220 cm. Het verlengen van de boor, zeker bij natte bodems waar het boormateriaal ingesmeerd raakt met bodemmateriaal kan tijdrovend zijn of waar het boorgat onder invloed van het grondwater dreigt dicht te slibben.

Bij diepe boringen wordt doorgaans begonnen met een combiboor, maar eens het grondwater is bereikt, kan het zeer lastig zijn om boormateriaal naar boven te krijgen. Vanaf dan is het nuttig over te schakelen op een guts. Door meerdere gutsen mee te brengen kan de volledige boring naast elkaar gelegd worden in plaats van de boring per lopende meter te moeten beschrijven, dit spaart veel tijd en verzekert ook een betere kwaliteit van de beschrijving als die in één keer kan gebeuren.

Voor een snelle en efficiënte beschrijving van de bodem kan de boring per lopende meter naast elkaar gelegd worden met een (mat) zwart plastic als onderlaag (figuren B66, B67).



Fig. B66: Uitleggen van een boring per lopende meter met aanduiding van de horizonten op een zwart plastic en met krijtbordje. Berg, Tongeren, provincie Limburg, België.

Fig. B67: Het uitleggen van een boring op de grond is niet duidelijk en is weinig bruikbaar voor bijvoorbeeld rapportage. Knokke-Heist, provincie West-Vlaanderen, België.



Controleer regelmatig het veldmateriaal op beschadigingen. Het meest voorkomende probleem zijn verlengstukken die krom getrokken zijn. Dit maakt het boren vrij lastig en de sluitbussen schuiven moeilijk op het verlengstuk. Het is praktisch onmogelijk om scheefgetrokken verlengstukken te herstellen. Een nieuwe kopen is de beste oplossing (figuur B68).

Maak regelmatig het boormateriaal schoon. Dit vergemakkelijkt het loskoppelen van de sluitbussen. Zeker tegen het einde van de dag is het een goede routine om het boormateriaal met water te reinigen. Ingedroogde klei op het handvat, de boorkop en het verlengstuk is nadien moeilijk te verwijderen. Neem eventueel een stevige borstel en een bidon water mee tijdens veldwerk (zie lijst veldmateriaal) om regelmatig het boormateriaal te reinigen (figuur B69).



Fig. B68: Het boormateriaal wordt gecontroleerd voor het begin van de boorcampagne. Saeftinghe, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. B69: Het boormateriaal wordt gewassen aan het einde van de werkdag. Saeftinghe, provincie Oost-Vlaanderen, België.

Hoe gebruik ik een combiboor?

- Een combiboor en andere vergelijkbare boortypes, worden in de grond gedraaid. Door het draaien van de boor zal de boorkop zichzelf (voor een stuk) in de grond trekken (figuren B70-B73).
 - In praktijk moet toch een zekere neerwaartse druk uitgeoefend worden, zeker bij het boren in wortelrijke horizonten of verharde (droge) of gecementeerde lagen.
 - De boor ongeveer 360° draaien tot ongeveer drievierde van de boorkop met grond is opgevuld. Voordat de boor uit de grond wordt gehaald, draai de boor een kwartslag terug, zo wordt vermeden dat de boorkoppunt in de grond vastzit.
 - De boor uit de grond trekken op een ergonomische manier door de beenspieren te gebruiken (lichtjes door de knieën buigen) en de rug te sparen.
 - Nooit te veel in één keer opboren, zeker niet bij kleiige texturen, omdat het dan vrij moeilijk is om het boorstaal uit de boorkop los te maken.
 - Bij diepe boringen, boringen in onrijp materiaal of boringen onder de watertafel kan het nodig zijn om met twee of zelfs drie personen de boor uit de bodem te trekken, omdat de boor zich vacuüm heeft getrokken (figuur B85).
 - Als het moeilijk is om de boor terug in het boorgat te krijgen, kan het zijn dat het boorgat een beetje versmald is. Door de handboor snel te draaien en traag in te duwen kan de boorwand opgekuist worden. Dit wordt herhaald tot de al eerder bereikte boordiepte terug bereikt is. Dit opgeboorde materiaal van de opkuisactie maakt geen deel uit van de te beschrijven boring.
- De zijkanten van het opgeboord materiaal in de boorkop worden afgeschraapt om het materiaal afkomstig van zijkanten van het boorgat te verwijderen (dit gebeurt bij het uittrekken van de boor, zeker bij nattere bodems); gebruik hiervoor een mes of een spatel.
- Vervolgens wordt de bovenste 1-3 cm van het boorstaal in de boorkop verwijderd (figuren B74, B75). Dan wordt gans het staal naar boven getrokken totdat het staal loskomt van de smallere onderkant van de boor.
- Het boorstaal wordt langs de lange zijde in twee gesplitst, bij voorkeur door de grond te breken met de handen ofwel, indien niet mogelijk (bijvoorbeeld rijpe klei), met behulp van een mes (figuren B76-B78).
- De diepte van het boorgat wordt gemeten met een vouwmeter en het staal wordt uitgelegd op een zwart stuk plastic zodat de diepte van de boring exact overeenkomt met de lengte van de tentoongestelde boring (figuren B79-B84).
- De boring dient tot minstens 30 cm in het moeder-materiaal uitgevoerd te worden. Indien er dieper een begraven bodem aanwezig is, wordt er nog dieper geboord (bijvoorbeeld begraven bodems aan de kust en in alluviale valleien).
- Soms bij diepere boringen in eerder plastisch of waterverzadigd bodemmateriaal slibt het boorgat toe. In dat geval moet het boorgat gekuist worden. Door herhaaldelijk de boring opnieuw uit te boren - opletten dat er niet dieper geboord wordt dan wat al eerder werd bereikt - wordt het boorgat groter gemaakt. Het opgeboord materiaal wordt weggegooid. Wanneer de boor weer vlot de al eerder maximale diepte bereikt, kan de boring verdergezet worden. Soms moet het uitkuisen van het boorgat meermaals herhaald worden.



Fig. B70-B73: De boor wordt ongeveer 360° in de grond gedraaid, gevolgd door een kwartdraai terug. Erna kan de boor uit de grond getrokken worden. Berg, Tongeren, provincie Limburg, België.



Fig. B74: De boorkop met het opgeboorde materiaal.

Fig. B75: De bovenste 3 cm van het boormateriaal wordt verwijderd, erna wordt het bodemstaal in de kop naar boven getrokken en uit de boor gehaald. Molenstraat, Damme, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. B76-B78: De boorkluiten worden volgens de diepte op het zeil gelegd (fig. B76). Daarna worden de kluiten in twee helften opengesneden om zicht te krijgen op het ongecontamineerde bodemmateriaal (fig. B77). Bij kleirijke horizonten zal het nodig zijn om de kluit met een mes in twee te snijden (fig. B78). Berg, Tongeren, provincie Limburg, België.



Fig. B79-B80: Met een tweede vouwmeter wordt regelmatig de boordiepte gecontroleerd (fig. B79). De gemeten boordiepte wordt vergeleken met het opgeboorde materiaal, desnoods wordt het opgeboorde materiaal samengedrukt of uitgespreid om overeen te komen met de effectieve boordiepte (fig. B80).



▲ Fig. B81: De boring voor het openleggen van de bodemkluiten.

Fig. B82: De boring na het openleggen van de bodemkluiten.

Fig. B83: De boring met de horizonten aangeduid.



◀ Fig. B84: Zicht op de topografie en vegetatie in de nabijheid van de boring. Fig. B79-B84: Molenstraat, Damme, provincie West-Vlaanderen, België.

Hoe gebruik ik een gutsboor?

In de meeste gevallen zal men de boring beginnen met een gewone combi- of kleiboor. Wanneer de boring niet verder kan gezet worden op deze manier, biedt een gutsboor dikwijls de oplossing. Dit is vooral het geval voor boringen in de grondwaterzone of in onrijpe kleiige sedimenten.

Voordat er wordt overgegaan tot boren met de guts wordt eerst de actuele boordiepte gemeten. Duw de guts niet dieper dan 100 cm in de grond. Er is eerder sprake van de boor in de grond te rammen dan te duwen tenzij de bodem vrij zacht (onrijp) is. Pas wanneer de boor voldoende diep in de grond is gestoken, wordt de boor gedraaid zodat het boorstaal los wordt gesneden. Vervolgens wordt de boring in één vloeiende beweging uit de grond getrokken bij voorkeur in een roterende beweging zodat het bodemmateriaal mooi in de boor blijft zitten.

Wanneer de guts uit de bodem is gehaald en indien er dieper dient geboord te worden, wordt zo snel mogelijk een verlengstuk en een nieuwe guts op-

gezet en wordt de boring verdergezet (figuren B85, B86). Bij het bereiken van de gewenste diepte wordt de boorkern schoongemaakt. Met een scherp mes worden dunne sneden grond, vertrekkend vanuit het centrale gedeelte van de boorkern en schuin naar de zijkanten toe, verwijderd tot ongeveer de boord van de gutswanden (figuur B87). Vervolgens worden de horizonten aangeduid en kan begonnen worden met de profielbeschrijving (figuur B88). Na de beschrijving wordt de guts zo goed mogelijk, zowel aan de binnen- als aan de buitenkant, gereinigd. Achtergebleven materiaal maakt de volgende boring moeilijker en contamineert bovendien het volgende staal.



Fig. B85-B88: Bij diepe boringen is het sterk aangeraden om met meerdere mensen te zijn om de boor in de grond te krijgen (fig. B85) en er weer uit te halen (fig. B86). Het boorstaal in de guts wordt schoon afgesneden met een mes (fig. B87), en vervolgens kan de beschrijving van de boring beginnen (fig. B88). Overleg in het veld is uiterst belangrijk voor een optimale uitvoering en interpretatie. Saeftinghe, provincie Oost-Vlaanderen, België.

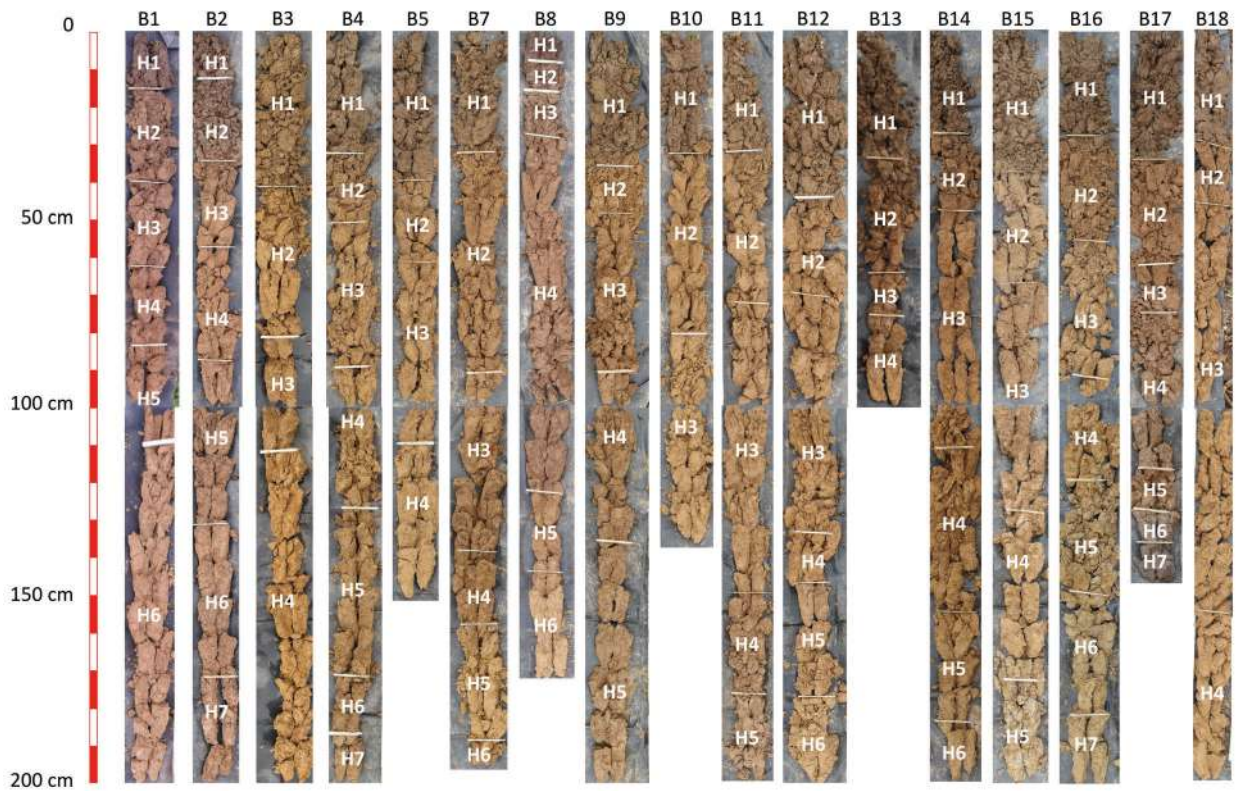
De boring voorbereiden voor de beschrijving

Nadat de gewenste diepte van de boring is bereikt, wordt de boring klaargemaakt voor de foto. Een kwaliteitsvolle foto is het belangrijkste aspect van de boring (figuren B89, B90). Enkel met een goede foto kan de veldinterpretatie volgens voortschrijdend inzicht nadien aangepast worden. Bij kwaliteitsvolle uniforme foto's kan ook gemakkelijk een fotocollage met meerdere boringen naast elkaar in het rapport geplaatst worden (figuur B91).

- De boring dient steeds op een uniform mat gekleurd stuk plastic gelegd te worden.
- Zorg er steeds voor dat 100 cm boormateriaal gelijk staat aan 100 cm boordiepte.
- Het opgeboord materiaal kan per 100 cm naast elkaar gelegd worden. Een boring van 350 cm diepte bestaat dus uit 3 boorstalen van 100 cm en één boorstaal van 50 cm.
- Zorg ervoor dat het opgeboord materiaal zo recht mogelijk op het plastic wordt gelegd.
- Het opgeboord materiaal wordt opengelegd voor een optimale foto: door de bodem op te breken, wordt zo veel mogelijk de natuurlijke bodemkleur getoond.
- Naast het boorstaal worden één of meerdere vouwmeters als schaal gelegd (figuur B92).
- Bij voorkeur wordt er een foto zonder en een foto met de aangeduide horizontgrenzen genomen, vervolgens ook nog een foto waarop het boorpunt in zijn landschappelijke context zichtbaar is. Indien mogelijk wordt de landschapsfoto zo genomen dat meerdere boorpunten tegelijk zichtbaar zijn. Een fotobord ligt steeds naast het boorstaal (figuren B82-B84, B92).
- Bij de boorbeschrijving worden eerst alle visueel te bepalen parameters (bijvoorbeeld kleur, wortels, vlekken...) beschreven. Vervolgens kunnen aspecten waar substalen vereist zijn, bepaald worden. Daarna kan de bodem getest worden op kalk en mangaanoxides en tot slot kunnen indien gewenst stalen genomen worden van bepaalde horizonten of deelhorizonten.
- Indien er macrofragmenten (natuurstenen, aarde-werk...) in het opgeboord materiaal worden waargenomen, kunnen deze een beetje gereinigd worden en op de juiste diepte gelegd worden op het opgeboorde materiaal zodat hun aanwezigheid zeker op de foto zichtbaar is (figuur B93).
- Wanneer de boorbeschrijving en eventuele staalname is afgerond, wordt het opgeboord bodemmateriaal terug in het boorgat gedeponeerd.



Fig. B89-B90: Tijd nemen voor een perfecte foto van een boring (fig. B89) en de omgeving (fig. B90) loont later bij de interpretatie van het booronderzoek. Het profiel toont een podzolbodem ontwikkeld op droge zandige binnenduinen. Waarschijnlijk is de bodem ooit enkele keren geploegd geweest waardoor de originele A en E horizont vermengd zijn. Ravels, provincie Antwerpen, België.



FG

Fig. B91: Mits kwaliteitsvolle foto's kan men een mooi overzicht van een boorraai samenstellen. Hoezekouterdreef, Aalst, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. B92: Boring tot 260 cm diepte met fotobord, de horizon-ten zijn aangeduid met witte latjes. Berg, Tongeren, provincie Limburg, België.



Fig. B93: Detail van een boring waar een stuk aardewerk in het opgeboorde materiaal werd gevonden en afgeborsteld voor een betere foto. Berg, Tongeren, provincie Limburg, België.

4.2. Het bodemprofiel

Locatie van het bodemprofiel

Bij een proefsleuvenonderzoek moeten de profielen weloverwogen geplaatst worden om een zo goed mogelijk beeld te krijgen van de bodemtypes en de laterale variatie binnen het onderzoeksgebied. In de praktijk wordt met de graafmachine meegelopen en daar waar een profiel wenselijk is, wordt dieper gegraven tot minimaal 30 cm in het moedermateriaal. Afhankelijk van de in het veld vastgestelde bodemcomplexiteit, kunnen de bodemprofielen ingedeeld worden in referentieprofielen waarvoor een gedetailleerde beschrijving vereist is en ondersteunende of bijkomende profielen die vooral dienen om de laterale verspreiding van bepaalde horizonten in kaart te brengen. De referentieprofielen brengen de natuurlijke bodemontwikkeling in kaart. Ze worden idealiter aangelegd daar waar de bodem het best bewaard is, dus niet in de zones aangetast door erosie of menselijke activiteiten. Nadien is het aan de aardkundige om te verklaren waarom er binnen het projectgebied zones zijn met een afwijkende bodemopbouw.

Oriëntatie van het bodemprofiel

Als het bodemprofiel wordt aangelegd op een helling dan volgt de lange zijde van het bodemprofiel de oriëntatie van de helling. De wand die beschreven wordt, ligt dus loodrecht op de dominante hellingsoriëntatie (figuren B94, B95). In veel gevallen is de helling zodanig zacht dat dit geen bepalende factor is voor de oriëntatie van het bodemprofiel. In dergelijke gevallen is het belangrijk om het profiel zo te oriënteren dat de bodemwand op het moment van beschrijving ofwel volledig in de zon ligt, ofwel volledig in de schaduw. Indien dit niet mogelijk is, dient voldoende schaduw gecreëerd te worden met een parasol of doek (figuren B96, B97).



Fig. B94-B95: Een bodemprofiel wordt op een helling aangelegd met de lange zijde evenwijdig aan de helling. Het opgegraven materiaal wordt langs de lange zijde, ofwel links ofwel rechts, van het profiel opgeslagen - NIET aan de bovenkant, dit voor een optimale foto. Sebystei, Altai, Rusland.



Fig. B96: Vooral in situaties waar de bodem gedeeltelijk in de schaduw en in de zon ligt, is een parasol onontbeerlijk zowel voor het interpreteren van de bodem, maar ook voor het fotograferen ervan. Keizersberg, Leuven, provincie Vlaams-Brabant, België.



Fig. B97: Een groter wandprofiel wordt voor een optimale foto in de schaduw gebracht met een zeil. Beursplein, Brugge, België.

Waarnemingen tijdens het graven van het profiel

De aardkundige dient steeds aanwezig te zijn tijdens het graven van het bodemprofiel. Als het bodemprofiel met de hand wordt uitgegraven dient de aardkundige hierbij te helpen. Er zijn bodemobservaties die veel duidelijker worden door de bodem zelf uit te graven, denk bijvoorbeeld aan structuur, compactie, aanwezigheid en grootte van stenen, plasticiteit, wortelgroei, geuren (detergenten, reductiezone...) of reductiekleuren die snel oxideren. Zelfs wanneer het bodemprofiel mechanisch wordt uitgegraven, gebeurt dit best in laagjes van 5-10 cm dikte. De

horizontale vlakken die hierdoor steeds worden blootgelegd, geven samen een goede indruk van de bodem in drie dimensies (figuren B98-B100). Door het begeleiden van het uitgraven van het bodemprofiel wordt ook verzekerd dat de juiste diepte (en breedte) bereikt wordt. Daarenboven, als blijkt dat het bodemprofiel op een ongelukkige positie is aangelegd, zodat het profiel niet representatief is voor het bodemlandschap (bijvoorbeeld een windworp, opgevulde gracht...), dan kan de locatie van het bodemprofiel snel aangepast worden zonder dat er hierdoor veel tijd verloren gaat.

64 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



Fig. B98-B100: Bodemobservaties beginnen al bij het graven van sleuven en profielputten. Het diepbewerken van deze bosbodem is veel duidelijker zichtbaar op de horizontale vlakken (fig. B98-B99) dan op de profielwand (fig. B100). Zoersel, provincie Antwerpen.



Observaties in drie dimensies

Sommige bodemkenmerken of -structuren vergen observaties in drie dimensies. Een mooi voorbeeld hiervan is de fragipan kenmerkend voor goed bewaarde leembodems. Deze polygoonstructuur dient zowel op verticale als op horizontale oppervlaktes bestudeerd te worden (figuren B101, B102).

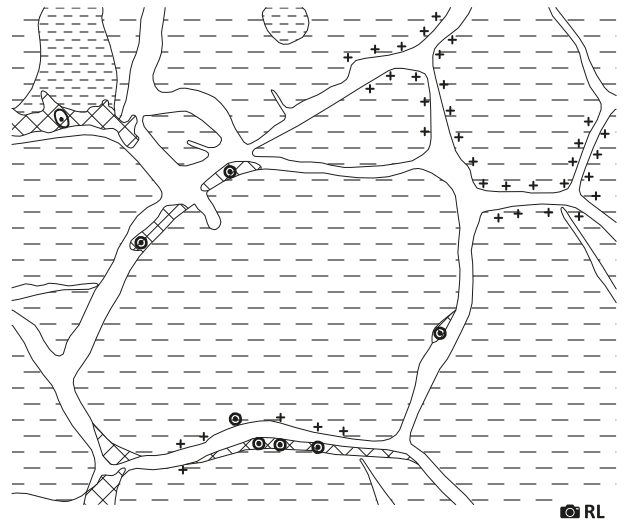


Fig. B101-B102: Horizontaal vlak van een lössbodem met fragipan structuur (fig. B101: foto; fig. B102: tekening). Zonienwoud, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België. (Mikkelsen *et al.*, 2005).

4.3. Bodemstaalname

Adequate bemonstering van bodemstalen is alleen mogelijk als de vraagstelling, waarvoor stalen vereist zijn, geformuleerd wordt voor en tijdens het veldwerk.



Staalnamestrategie

De staalnamestrategie wordt voornamelijk bepaald door het type onderzoek en de doelstelling hiervan, maar ook in functie van de aardkundige setting van het onderzoeksgebied. De strategie is anders voor een booronderzoek dan voor een opgraving. Bij een landschappelijk booronderzoek zullen er doorgaans geen stalen genomen worden. Toch wordt het aangeraden om steeds staalnamezakken mee te brengen voor het geval dat er in het boorstaal artefacten of speciale bodemelementen opduiken waarvoor verder onderzoek nodig is (figuren B103, B104).



Fig. B103-B104: Deze boring gebeurde in een zone aangeduid als een Aba1-bodem volgens de Belgische bodemkaart. De bodemkaart is gesteund op boringen tot 125 cm diepte. Op een diepte van 333 cm, werd er onverwachts een schelpenlaag opgeboord. Deze speciale horizont kon bemonsterd worden, omdat staalnamezakken standaard meegebracht werden. Berg, Tongeren, provincie Limburg, België.

66 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

Voor bodemprofielen bestudeerd in het kader van een proefsleuvenonderzoek is het evenmin de gewoonte om stalen te nemen voor verder onderzoek. Een staalnamestrategie bepalen voor het vervolgonderzoek op een proefsleuvenonderzoek kan de aardkundige gemakkelijk in het veld beslissen en onderbouwen met foto's. In speciale gevallen of bij uitzonderlijke observaties kan men al stalen nemen die dan ter beschikking gesteld worden voor een vervolgonderzoek.

Bij opgravingen dienen er in het algemeen voldoende referentieprofielen beschreven te worden om het complete bodemlandschap van het projectgebied te kunnen documenteren. Staalname gebeurt daar waar verdere analyses nodig zijn volgens algemene of specifieke vraagstellingen. Dit kunnen eenvoudige vragen zijn, zoals de zuurtegraad van de bodem en de daaraan gekoppelde bewaringstoestand voor pollen of botmateriaal, of stalen om textuur te bepalen. Complexere vragen kunnen bijvoorbeeld gelinkt worden aan de antropogene activiteiten in en op de bodem, zoals bepaalde ambachten waarvoor dan staalname in combinatie met micromorfologisch onderzoek gebeurt.

Staalnamepositie

Stalen voor laboratoriumanalyses kan men op verschillende manieren verzamelen. De wijze van bemonstering dient te worden vermeld op de schets van het profiel en op de bemonsteringslijst. De keuze van de bemonsteringsprocedure en strategie moet in functie zijn van de variabiliteit van de bodem binnen de horizont.

- Het **samengestelde staal**: het staal bestaat uit meerdere (gewoonlijk 3-5) bodemmonsters per bodemhorizont. Deze deelmonsters kunnen apart worden bewaard (bijvoorbeeld P12H2a, P12H2b, P12H2c, P12H2d), of kunnen samen in één zak worden gemengd (bijvoorbeeld P12H2).
- Het **gewogen gemiddelde staal**: het staal bestaat uit materiaal dat de volledige dikte van de horizont evenredig vertegenwoordigt.
- Het **centrale staal**: een monster dat min of meer in het midden van de horizont is genomen, waar de kenmerken van de horizont het best ontwikkeld zijn.

Elk type van staalname kent zijn voor- en nadelen. De keuze van de methode moet in functie zijn van de doelstelling van de staalname. Vaak wordt de centrale staalname methode toegepast, omdat dit

een staal geeft waarin de bodemkenmerken het best ontwikkeld zijn.

Hoeveelheid bodemmateriaal voor chemische en fysische laboratoriumanalyses

De benodigde hoeveelheid bodemmateriaal van een staal is vooral afhankelijk van 1) het aantal en de soort uit te voeren analyses, 2) de bodemsoort, en 3) de noodzaak om een deel van het staal te archiveren.

Op monsters met geen of zeer weinig grof materiaal is de richtlijn een minimumgewicht van 200 gram, bij voorkeur 500 gram en is 1 kilogram aanbevolen voor belangrijke monsters of voor bodemstaalname van heterogene horizonten.

Chemische en fysische bodemanalyses uitgevoerd in het laboratorium, gebeuren op enkele analyses na, uitsluitend op de fractie fijner dan 2 mm. Indien een staal wordt genomen waarin er 80 % grind, stenen of antropogeen grof materiaal zit, dan moet minstens 1 kg staal genomen worden om minstens 200 gram fijn materiaal te kunnen garanderen.

Voor bodems die veel organisch materiaal bevatten, is er ook een groter bodemstaal nodig. Voor bijvoorbeeld de textuuranalyses volgens de pipette methode wordt immers eerst het organisch materiaal vernietigd zodat er meer van het bodemstaal nodig is dan de gebruikelijke hoeveelheid.

Labelen van een bodemstaal

Het bodemstaal dient direct gelabeld te worden aan de hand van een staalkaartje zodat er geen enkele twijfel over de herkomst kan ontstaan. Een voorbeeld van een labelcode kan er als volgt uitzien:

projectcode: 2020W242

datum: 9/10/20

naam aardkundige (indien nodig): NN

profielnummer: P13

horizont nummer: H6

diepte monster: 64-73 cm

De informatie op het staalkaartje en eventueel bijkomend op de verpakking van het monster wordt: W242/9/10/20/NN/P13/H6/64-73cm

Staaltypes en staalnameprocedures

Tijdens het veldwerk is het **uiterst belangrijk** te vermijden dat genomen stalen die zich in zakken, dozen of metalen ringen bevinden, aan de zon worden blootgesteld. Het is aangeraden om de stalen tijdens het terreinwerk te bewaren in een koelbox, anders verdampt het water uit het monster en condenseert het in dezelfde zak of bak (figuur B105). Het opwarmen van het monster zal ook de biologische activiteit binnen het monster doen versnellen. Na het veldwerk is het belangrijk om de bodemstalen in een goed verluchte ruimte open te spreiden om ze langzaam te laten drogen aan de lucht. De stalen worden bij voorkeur overgebracht in gelabelde plastic bakjes of schaalpjes. Na enkele weken drogen kunnen de stalen opgeborgen worden.



Staalname voor fysische en chemische laboratoriumanalyses

Door gebruik te maken van een mes en een staalnamebakje wordt de aarde voorzichtig losgemaakt (figuren B106, B107). Bij gebruik van een staalnamebakje kan je materiaal dat per ongeluk in het staal terechtkomt, eenvoudig verwijderen voordat het staal in de zak wordt gebracht.

Monsters voor standaard bodemlaboratoriumanalyses worden meestal in plastic zakken bewaard (figuren B108-B111). De handigste zakjes zijn deze met een ritssluiting en met een speciaal schrijfvlak voor het noteren van de code.

Speciale stalen worden ofwel in plastic zakken bemonsterd voor speciale laboratoriumanalyses, ofwel in een speciaal recipiënt.

Staalname voor bodem-mesomorfologie

Voor het verder bestuderen van de bodem onder een stereomicroscop worden natuurlijke bodemstructuureenheden (aggregaten) voorzichtig bemonsterd en omgeven door los bodemmateriaal en bewaard in dozen.

Fig. B105: Eens het bodemstaal is genomen, wordt het zo snel mogelijk bewaard in een koelbox. Het staal laten liggen in de zon, veroorzaakt opwarming van het bodemstaal en condensatie in de plastic zak wat de (micro)biologische activiteit in het bodemstaal versnelt.



Fig. B106-B111: Staalname van geroerde monsters voor algemene laboratoriumanalyses met gebruik van een staalnamebak. Sint-Gillis-Waas, provincie Oost-Vlaanderen, België.

Staalname voor micromorfologie

Traditioneel werd een Kubiena doos gebruikt voor het impregneren van een staal voor micromorfologie (figuren B112-B114). Zo'n metalen doosje is genoemd naar Walter Ludwig Konstantin Ritter von Kubiena, Prof. W. Kubiena, die beschouwd wordt als de grondlegger van het micromorfologisch onderzoek in de bodemkunde. De Kubienadoos heeft een afmeting van 80 x 65 x 40 mm en is gemaakt van aluminium; andere metalen kunnen worden gebruikt op voorwaarde dat ze niet oxideren. Bij het bemonsteren met een Kubienadoos worden de deksels verwijderd en wordt de doos voorzichtig in het bodemprofiel geslagen. De randen van de doos worden losgesneden en vervolgens wordt de doos aan de buitenkant met het eerste deksel gesloten. Met een mes wordt het bodemstaal verder losgesneden van de aarde en de doos dieper in de profielwand geduwd. De doos wordt uit de bodem gehaald en de overtollige aarde verwijderd. Met het tweede deksel wordt de doos gesloten. De doos wordt volledig dichtgetaped om vochtverlies te voorkomen (figuur B112).

Bemonstering in Kubiena dozen wordt vaak uitgevoerd wanneer de grond erg kwetsbaar of los is.

Anders zijn gewone plastic dozen in allerlei maten een goedkoop en in de meeste gevallen een goed alternatief (figuur B113, B115-B123).

Het ongestoorde monster kan worden gebruikt voor meso- en/of micromorfologie. In het laatste geval wordt het monster geïmpregneerd met hars dat uithardt zodat naderhand slijpplaten kunnen gemaakt worden (Stoops & Nicosia, 2017).

In de voorbije jaren is het gebruik van in de handel verkrijgbare '*metal stud*' profielen steeds meer de standaard geworden bij staalname voor natuurwetenschappelijk onderzoek op archeologische sites, zoals bij vruchten-, zaden- of pollenonderzoek. De '*metal stud*' is standaard 50 mm breed en 40 mm diep, wat aan de smalle kant is voor het maken van slijpplaten voor micromorfologie (figuur B114). Hiervoor is het beter om de '*metal stud*' met breedte 7,5 cm te gebruiken. Bij langdurig bewaren van stalen in '*metal stud*' profielen bestaat wel de kans dat het metaal begint te roesten onder invloed van het aanwezige bodemvocht. In dergelijke gevallen dient het bodemstaal uitgedroogd te worden en herverpakt voor verdere opslag of bewaard te worden in een koele omgeving.

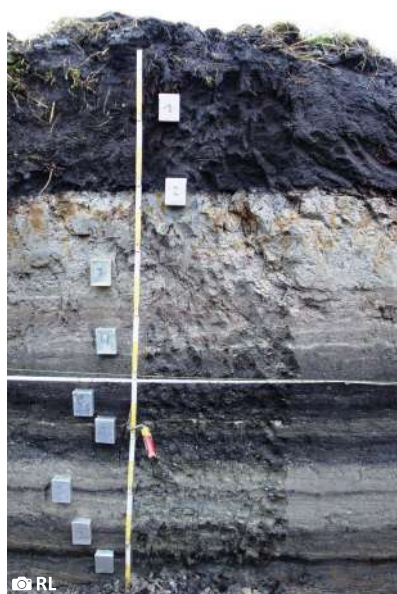


Fig. B112-B114: Staalname van ongestoorde monsters met Kubienadoosjes (fig. B112), plastic doosjes (fig. B113) en metalen profielen (fig. B114). B112: Moerbeke, provincie Oost-Vlaanderen, België; fig. B113: Sint-Gillis-Waas, provincie Oost-Vlaanderen, België; fig. B114: Beurssite, Hauwerstraat (Beurplein), Brugge, provincie West-Vlaanderen, België.

70 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



Fig. B115-B123: Werkwijze voor staalname van ongestoorde monsters. Eerst wordt de wand mooi afgeschrapt en geëffend en wordt de zone aangeduid waar de bemonstering moet gebeuren (fig. B115). Staalnamebakjes worden gelabeld en georiënteerd door een pijl op het recipiënt te tekenen (fig. B116). De grootte van het te nemen staal wordt afgepast en in de bodem gekrast (fig. B117). Met een mes wordt de oriëntatie van het bodemstaal met een pijl aangeduid, de 4 wanden van het staal worden voorzichtig met een mes zo diep mogelijk vrijgemaakt (fig. B118-B120). Het doosje wordt in de gleuven rond het staal geschoven en met een spatel wordt de achterkant van het bodemstaal verder losgemaakt (fig. B121). Het te veel aan materiaal wordt voorzichtig afgeschrapt. Het recipiënt, voorzien van een staalkaartje wordt afgesloten (fig. B122) en gestockeerd voor transport (fig. B123). Sint-Gillis-Waas, provincie Oost-Vlaanderen, België.

Staalname voor het bepalen van het schijnbaar soortelijk gewicht (Eng.: *Bulk density*)

Voor het bepalen van het schijnbaar soortelijk gewicht worden metalen ringen met een exact volume van bijvoorbeeld 100 cm³ gebruikt (figuur B25). Meestal worden deze monsters genomen op horizontale vlakken. Op verticale vlakken kan het ook, maar vaak bestaat het risico dat het monster instort. Een horizontaal oppervlak wordt voorbereid op het niveau waar de bemonstering gewenst is. Voor een homogene horizont (bijvoorbeeld een ploeglaag) volstaan 3 stalen; bij natuurlijk ontwikkelde en relatief homogene horizonten (bijvoorbeeld een E-, en B- of een C-horizont) worden 5 stalen aanbevolen en bij heterogene horizonten (bijvoorbeeld een Bt-horizont of een grindhoudende horizont) zijn 8 stalen gewenst. De ringen worden dan voorzichtig recht in de grond geduwd en liefst ongeveer 5 mm dieper. Het is erg belangrijk om verdichting tijdens de bemonstering te vermijden, door zo recht mogelijk de ring in de bodem te duwen of te slaan. Een plankje wordt over de ring gelegd en met een impactvrije hamer wordt de ring zachtjes in de bodem geklopt. Indien de stalen mogelijk verdicht worden bij het inslaan van de ring, neem dan 5 of 8 ringen in plaats van 3 of 5 ringen om de foutenmarge te verkleinen. De monsters worden voorzichtig losgesneden.

Als het staal enkel dient om het schijnbaar soortelijk gewicht te bepalen, kan het staal uit de ring gehaald worden en in een plastic zakje overgebracht worden. Anders worden de ringen aan beide zijden met een deksel gesloten en naar het laboratorium getransporteerd. Deze laatste werkwijze maakt het mogelijk om sneller te werken in het veld, op voorwaarde natuurlijk dat er voldoende ringen zijn om alle monsters te verzamelen.

4.4. Foto-opnames

Het nemen van foto's is voor alle aspecten van het werk van de aardkundige essentieel. Het belang van het voorbereiden van een boring of een bodemprofiel voor een optimale foto mag niet onderschat worden. Voor de verdere interpretatie van een site of een dossier zijn de foto's cruciaal.

Boor, sleuf of profielfoto's

Het is essentieel dat voor de foto de boring goed is uitgelegd, of de bodem of sleufwand goed is opgekuist. Gebruik een vouwmeter of rolmeter die goed zichtbaar is op de foto. Probeer de foto zo recht mogelijk ten opzichte van de boring of profielwand te houden. Gebruik zeker geen camera instelling zoals zonsondergang waarbij de foto's een warmere kleur krijgen dan in het echt. Voor een zo correct mogelijke weergave van de kleuren kan een kleurenkalibratiebord gebruikt worden. Met de nodige software kan nadien de kleur van de foto's bijgewerkt worden.

Het is sterk aanbevolen om volgende foto's te nemen (zie ook de illustraties in Mikkelsen *et al.*, 2022: figuren 25-31):

- foto van de opgekuiste boring/profielwand/sleufwand (figuur B124),
- foto van de opgekuiste boring/profielwand/sleufwand met de horizonten aangeduid (figuur B125),
- foto van de opgekuiste boring/profielwand/sleufwand met de staalname aangeduid (figuur B126),
- detailfoto's van interessante of complexe delen van de boring/profiel/sleuf,
- foto's van de omgeving, best vanuit verschillende richtingen.



Fig. B124-B126: Foto van een bodemprofiel: opgekuist (fig. B124), met aanduiding van de horizonten (fig. B125) en na staalname (fig. B126). Sint-Gillis-Waas, provincie Oost-Vlaanderen, België.

Staalnamefoto's

In geval van een boring: neem een foto van de boring nadat de staalnamezakjes gevuld zijn. Plaats hierbij de gevulde staalname zakjes op de plaats waar de bodemhorizont eerder op de plastic uitgespreid werd. Op de foto is het dus zichtbaar welke horizonten bemonsterd zijn en welke niet.

In geval van een staalname van een bodemhorizont in een profielput: neem vooraf aan de staalname een foto van het bodemprofiel waarop de locatie van de stalen aangeduid is, bijvoorbeeld door een cirkel in de bodemwand te tekenen (figuur B125). Neem ook een foto van na het nemen van de sta-

len, soms blijkt het namelijk dat een bepaald staal toch anders is genomen dan oorspronkelijk gepland (figuur B126).

Voor micromorfologie is het belangrijk om foto's te nemen van het te bemonsteren profiel voor de staalname. Voorts dienen er foto's genomen te worden waarbij de locatie van de stalen duidelijk is aangegeven op het bodemprofiel. Tot slot is het ook aangeraden om foto's te nemen van het bodemprofiel met de gemarkeerde staaldoosjes (figuren B112-B114).

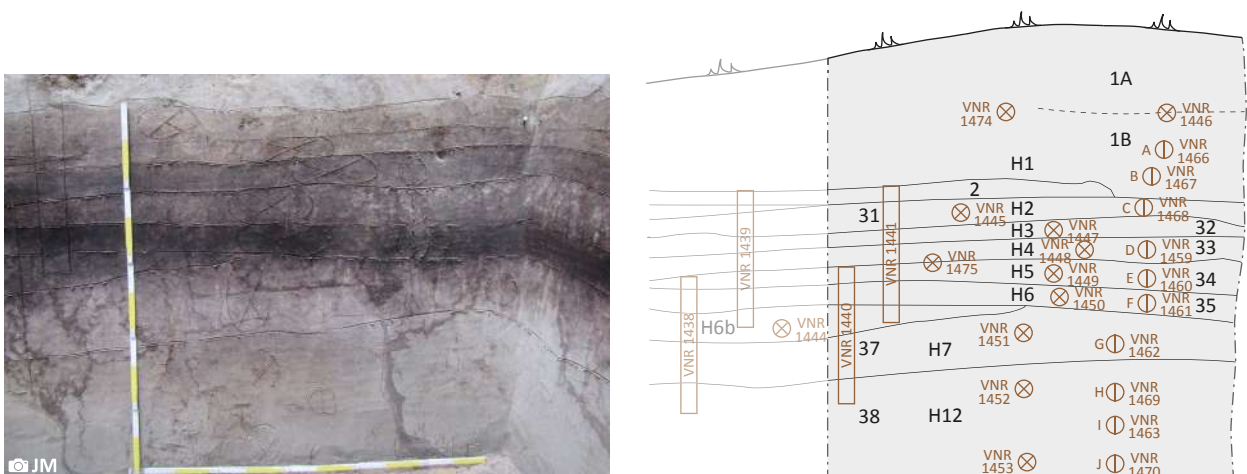


Fig. B127-B128: Bodemprofiel met de aanduiding van de horizontgrenzen en staalnelocaties, op de bodemwand (fig. B127) en op de archeologische tekening (fig. B128). De aanduidingen met een kruis in een cirkel zijn voor bodemanalysen, een kleinere cirkel met een verticale streep voor OSL-dateringen. De staalname voor pollen of micromorfologie is in de vorm van een rechthoek in de bodemwand gekrast. (Abelskamp-Boos *et al.*, 2022).



Fig. B129: Zicht op een bodemprofiel in een bredere archeobodemkundige context. Sint-Baafskathedraal, Gent, provincie Oost-Vlaanderen, België.

REFERENTIES

- Abelskamp-Boos, K., Bleys, E., Cleeren, N., Comis, S., Deák, J., De Cupere, B., Deforce, K., De Groote, I., De Gryse, J., Devos, I., Eggermont, S., Germonpré, F., Kubiak-Martens, L., Laleman, M-C., Lange, S., Massagé, L., Mikkelsen, J., Oudemans, T., Palmer, J., Pijpelink, A., Ron-sijn, W., van den Dorpel, A., Vandewalle, E., Van Haaster, H., Velleman, J., Verbruggen, F., Vrielinck, S. & Wongsan-tativanich, M. 2022. Archeologisch onderzoek in en rond de Sint-Janskerk (Sint-Baafskathedraal), Gent (eds. De Gryse, J. & Eggermont, S.). Eindverslag. Ruben Willaert, Brugge, 1694 pp.
- Anonymus, 1954. *Munsell Soil Color Charts*. Munsell Col-or Company, INC, Baltimore, Maryland, USA.
- Belgisch Staatsblad, 2019. Ministerieel besluit van 29 maart 2019 tot vaststelling van de code van goede prak-tijk voor de uitvoering van rapportering over archeolo-gisch vooronderzoek en archeologische opgravingen en het gebruik van metaaldetectoren. Belgisch Staatsblad 5/4/2019, 2019011583, 33748-33965.
- Bourgeois, I., Cruz, F., Allemeersch, L., Cryns, J., Mikkelsen, J. & van der Meer, W., 2014. Evolutie van een ijzer-tijdlandschap te Lier Duwijkstraat II. Het rijke verleden van ze-ven waterputten. *LUNULA, Archaeologia protohistorica*, XXII, 45-150.
- Bruyninckx, T., 2017. Archeologische opgraving Ingel-munster, Nijverheidsstraat (prov. West-Vlaanderen). Basisrapport. Monument Vandekerckhove nv. Rapport 2017/21, 217 pp.
- Cryns, J., Laloo, P., Noens, G., Reniere, S., Cruz, F., Mik-kelsen, J., Allemeersch, L., Teetaert, D., De Brant, R., Van Goidsenhoven, W., Vandermeer, W. & Lange, S., 2014. Lier – Duwijkstraat II. De geschiedenis van een bedrijventer-rein. Eindrapportage van de archeologische opgraving van een meefasige occupatie van het gebied Duwijkstraat II. Gate Rapport 63. Bredene, Ghent Archeological Teams bvba. 573 pp.
- Cryns, J., Noens, G. & Mikkelsen, J., 2016. Rapportage van een proefsleuvenonderzoek naar aanleiding van de aan-leg van twee wachtbekkens. Evergem. Ghent Archaeolog-ical Team bvba (GATE) (2016/375), 65 pp.
- Dondeyne, S., Vanierschot, L., Langohr, R., Van Ranst, E. & Deckers, J., 2014. The soil map of the Flemish region con-verted to the 3rd edition of the World Reference Base for soil resources. Studie in opdracht van de Vlaamse Over-heid, BOD/STUD/2013/01, 139 pp.
- Emis, 2024. Compendium voor monsterneming en anal-yse in uitvoering van het Materialendecreet en het Bo-demdecreet. Vlaamse Milieuwetgeving. Goedgekeurd bij ministerieel besluit van 30 april 2025 (publicatie in Bel-gisch Staatsblad 16/05/2025).
- IUSS Working Group WRB, 2014. *World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 181 pp.
- IUSS Working Group WRB, 2022. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vien-na, Austria, 236 pp.
- Maréchal, R. & Tavernier, R., 1971. *Pedologie – Bodemas-sociaties*. Atlas van België. Blad 11B, MGI.
- Maréchal, R. & Tavernier, R., 1974. *Pedologie*. Atlas van België. Commentaar bij de bladen 11A en 11B. Uittrek-sels van de bodemkaart. Bodemassociaties. Nationaal Comité voor Geografie. Commissie voor de nationale at-las. Gent, 64 pp.
- Meylemans E. & Petermans T., 2017. *Het gebruik van la-seraltimetrische gegevens en het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen in het kader van archeologisch en landschap-pelijk onderzoek. Enkele basisprincipes en richtlijnen*. Handleidingen agentschap Onroerend Erfgoed 17, Brus-sel, 61 pp.
- Mikkelsen, J., Cools, N., De Vos, B. & Langohr, R., 2005. Excursion guide Zonian Forest (23rd Nov. 2005) Straalse-bossen & Pijnven (24th Nov. 2005). Training Course on WRB (World Reference Base, 1998), Soil Profile Descrip-tion and Classification. November 21st – 25th 2005, Brus-sels, Belgium. Organised within the framework of the EU Forest Focus Demonstration Project BIOSOIL. Geraards-bergen, Research Institute for Nature and Forest, 86pp.
- Mikkelsen, J., Devos, Y., & Landsheere, C., 2020. Micro-morfologisch-bodemkundig onderzoek op de site Hotel van den Meersche, Nederpolder 1, Gent. Bodemkundig rapport. AardeWerk-Raakvlak Archeologisch Onderzoek. Brugge. 31pp.
- Mikkelsen, J., Ampe, C., Cools, N., Devos, Y., Dondeyne, S., Oorts, K., Pieters, M. & Langohr, R., 2022. *Veldhand-leiding voor het beschrijven van bodems bij archeologisch onderzoek in Vlaanderen*. Handleidingen agentschap On-roerend Erfgoed 29, Brussel, 80 pp.
- Noens, G. & Mikkelsen J., 2012. *Aanvullend proef-puttenonderzoek Nijverheidstraat, Ingelmunster (prov. West-Vlaanderen)*. Basisrapport, Monument Vandekerckhove nv.
- Simonson, R., 1993. Soil Color Standards and Terms for Field Use – History of Their Development. In: *Soil Color* (Eds. Bidham, J. & Ciolkosz, E.), 1-20. SSSA Special Publi-cation No. 31, 159 pp.
- Stoops, G. & Nicosia, C., 2017. Sampling for soil micro-morphology. In: *Archaeological Soil and Sediment Mi-cromorphology* (eds. Nicosia, C. & Stoops, G.), 385-391. Wiley, 2017, 476 pp.

Van Ranst, E. & Sys, C., 2000. Eenduidige legende voor de digitale bodemkaart van Vlaanderen (schaal 1/20.000). Universiteit Gent. Laboratorium voor Bodemkunde, 361 pp. <https://www.dov.vlaanderen.be/page/digitale-bodemkaart-van-het-vlaams-gewest>.

Van Gils, M. & Meylemans, E., 2022. Booronderzoeken. Vooronderzoek naar artefactensites uit de steentijd: methodiek en afwegingen. Afwegingskaders agentschap Onroerend Erfgoed nr. 11, Brussel, 240 pp.

Geraadpleegde websites op 10/09/2025

www.dov.vlaanderen.be

www.geopunt.be

www.meteo.be

https://reflabos.vito.be/2025/CMA_1_A.1.pdf

Archeologische en geologische tijdschaal

Benallou, M., Dalle, S., Annaert, R., Creemers, G., Cherré, B., Bourgeois, J., Van Impe, L., Warmenbol, E. & De Mulder, G., 2024. Onderzoeksbalans archeologie in Vlaanderen, versie 2, 1/05/2024: bronstijd – ijzertijd. Onderzoeksrapporten Agentschap Onroerend Erfgoed nr. 326, Brussel, 253 pp.

Deschepper, E., De Clercq, W., Baeyens, N., De Mulder, J., Van Thienen, V. & Dekoninck, M., 2025. Onderzoeksbalans archeologie in Vlaanderen, versie 2, 26/03/2025: vroege middeleeuwen. Onderzoeksrapporten Agentschap Onroerend Erfgoed nr. 357, Brussel, 545 pp.

Hoek, W., 1997. Late-glacial and early Holocene climatic events and chronology of vegetation development in the Netherlands. *Vegetation History and Archaeobotany*, 6(4), 197-213.

Noens, G., Van Baelen, A., Verhegge, J., Sergeant, J., Crombé, Ph., Bats, M., De Bie, M., De Wilde, D., Perdaen, Y., Van Gils, M. & Vermeersch, P., 2021. Onderzoeksbalans archeologie in Vlaanderen, versie 2, 19/05/2021: mesolithicum. Onderzoeksrapporten agentschap Onroerend Erfgoed nr. 188, Brussel, 165 pp.

Ryssaert, C., Depaepe, I., Perdaen, Y., De Bie, M., Van Peer, P., Crombé, Ph., Van Gils, M., Van Baelen, A. & De Wilde, D., 2021. Onderzoeksbalans archeologie in Vlaanderen versie 2, 01/06/2021: paleolithicum. Onderzoeksrapporten agentschap Onroerend Erfgoed nr. 191, Brussel, 125 pp.

Storme, A., Louwye, S., Crombé, Ph. & Deforce, K., 2017. Postglacial evolution of vegetation and environment in the Scheldt Basin (northern Belgium). *Veget. Hist. Archaeobot.*, 26, 293-311. DOI: 10.1007/s00334-016-0594-7

Vanmontfort, B., 2022. Onderzoeksbalans archeologie in Vlaanderen, versie 2, 01/01/2022: neolithicum. Onderzoeksrapporten Agentschap Onroerend Erfgoed nr. 215, Brussel, 128 pp.

Verbruggen, C., Denys, L. & Kiden, P., 1996. Belgium. In: *Palaeoecological events during the last 15.000 years: regional syntheses of palaeoecological studies of lakes and mires Europe* (eds. Berglund, B., Birks, H., Ralska-Jasiewiczowa, M. & Wright, H.). John Wiley & Sons, 158, 453-474.

Archeologische perioden							
Tijdperk	Periode	Subperiode	Cultuur	Regio	Datering		
					Begin	Einde	
Prehistorie	Paleolithicum	Vroeg			Ca. 500.000	Ca. 300.000	BCE
		Midden			Ca. 300.000	Ca. 45.000	BCE
		Laat	Magdaleniaan		Ca. 45.000	Ca. 15.000	BCE
		Finaal	Federmesser		Ca. 15.000		BCE
			Ahrensburgiaan				
					9.400	BCE	
	Mesolithicum	Vroeg			9.400	7.500	BCE
		Midden			7.500	6.250	BCE
		Laat		Leemstreek	6.250	5.300	BCE
		Laat		Zandstreek	6.250	4.750	BCE
		Finaal		Zandstreek	4.750	4.000	BCE
		Neolithicum	Vroeg		Leemstreek	5.300	4.800
	Hiaat		Leemstreek	4.800	4.300	BCE	
	Midden		Leemstreek	4.300	3.500	BCE	
	Midden		Zandstreek	4.000	3.500	BCE	
	Laat			3.500	3.000/2.850	BCE	
	Finaal			3.000/2.850	2.000	BCE	
Protohistorie	Bronstijd	Vroeg			2.100/2.000	1.750/1.800	BCE
		Midden			1.750/1.800	1.050	BCE
		Laat			1.050	800	BCE
	IJzertijd	Vroeg			800	475/450	BCE
		Midden		Oosten	475/450	250	BCE
		Laat		Oosten	250	57	BCE
		Laat		Westen	475/450	57	BCE
Historie	Romeinse Tijd	Vroeg			57	69	BCE/CE
		Midden			69	275	CE
		Laat			275	480	CE
	Middeleeuwen	Vroeg	Merovingisch		480	750	CE
			Karolingisch		750	900	CE
		Vol			900	1.200	CE
		Laat			1.200	1.500	CE
	Moderne Tijd			1.500	1.800	CE	
Nieuwste Tijd			1.800	2.000	CE		

Archeologische en geologische tijdschaal

De archeologische tijdschaal (links) toont de archeologische indeling/perioden, de belangrijkste culturen en de regionale variaties. De geologische tijdschaal (rechts) stelt de chronostratigrafische en geochronologische indeling voor. Ook de biozones voor het Laatglaciaal en het Holoceen zijn aangeduid.

Verdiepende informatie

Bij het opstellen van de archeologische en geologische tijdschaal werden een aantal keuzes gemaakt. Het is gebruikelijk dat bij de archeologische tijdschaal de jongste beschavingen onderaan staan, bij een geologische tijdschaal staan deze bovenaan. Voor de leesbaarheid van de tabel, begint de geologische tijdschaal hier eveneens met de oudste afzettingen bovenaan. De dateringen van de archeologische perioden zijn

aangeduid in een jaargetal voor (BCE) of na Christus (CE). De geologische dateringen zijn aangeduid in BP (Before Present), waarbij het jaargetal 1950 als 'jaar 0' telt. De geologische dateringen zijn in de tabel ook aangeduid als jaargetallen voor of na Christus.

De archeologische tijdschaal is ingedeeld volgens 'tijdperk, periode en subperiode'. Voor enkele subperiodes zijn ook de belangrijkste culturen vernoemd. Vanaf het laatmesolithicum evolueert de samenleving sneller in de (zand)leemstreek dan in de zandstreek (Crombé & Vanmontfort, 2007; Van Gils et al., 2019). In de leemstreek ontbreken archeologische vondsten uit de periode tussen 4800 en 4300 BCE. Deze tijdsperiode is daarom ingevuld als hiaat. Verder is er ook voor de ijzertijd een verschil tussen het westen en het oosten van het land. Deze

	Geologische perioden				Biozone	Datering					
Chronostratigrafie:	Systeem	Serie	Etage (NW-Europa)								
Geochronologie:	Periode	Tijdvak	Tijd			Vlaanderen	Begin	Einde		Begin	Einde
Quartair	Pleistoceen	Weichseliaan	Eemiaan			126.000	116.000	BP	124.000	114.000	BCE
			Vroegglaciaal	116.000		73.000	BP	114.000	71.000	BCE	
				Pleniglaciaal		73.000	15.000	BP	71.000	13.000	BCE
						Laat Pleniglaciaal	15.000	14.650	BP	13.000	12.700
				Laatglaciaal	Bølling		14.650	14.000	BP	12.700	12.050
			Oude Dryas		14.000	13.900	BP	12.050	11.950	BCE	
			Allerød		13.900	12.850	BP	11.950	10.900	BCE	
			Jonge Dryas		12.850	11.650	BP	10.900	9.700	BCE	
		Holoceen	Vroeg (Greenlandiaan)		Preboreaal	11.650	10.600	BP	9.700	8.650 -1.950	BCE
					Boreaal	10.600	8.600	BP	8.650	6.650	BCE
	Atlanticum				8.600	4.000	BP	6.650	2.050	BCE	
	Subboreaal				4.000	2.800	BP	2.050	850	BCE	
	Subatlanticum				2.800	heden	BP	850	heden	BCE/CE	
	Laat (Meghalayaan)										

regionale variaties zijn eveneens in de tabel opgenomen.

De geologische tijdschaal wordt ingedeeld volgens de chronostratigrafie in 'systeem, serie en etage'. De chronostratigrafie bestudeert de pakketten van sedimenten en gesteenten die in een bepaalde geologische tijd zijn gevormd en hun relatieve opeenvolging. De geochronologie heeft tot doel het dateren van gesteenten, mineralen en geologische gebeurtenissen. Deze tijdschaal is ingedeeld in 'periode, tijdvak en tijd'. Een vaak gebruikte, informele onderverdeling is die van het Weichseliaan in Vroeg-, Pleni- en Laatglaciaal, deze zijn als ijstijdfasen in de tabel aangeduid. Het Vroeg-, Midden- en Laat-Holoceen worden ook respectievelijk Greenlandiaan, Northgrippiaan en Meghalayaan genoemd. Deze voor archeologen eerder onbekende tijdsperioden zijn weergegeven om de link met de

internationale stratigrafie te kunnen maken. De datering van biozones, of pollenzones, is in hoge mate afhankelijk van de regionale vegetatieontwikkeling en kan sterk variëren. Het is daarom belangrijk om te vermelden voor welke regio de dateringen gevalideerd zijn en welke referentiewerken geraadpleegd zijn. De hier gebruikte dateringen voor de holocene biozones zijn uitgewerkt door Storme et al. (2017) en Verbruggen et al. (1996) voor de Scheldevallei. De dateringen van de zonegrenzen van het Laatglaciaal volgen Hoek (1997).

De tijdstabel is tot stand gekomen met gewaardeerde input van Prof. Dr. Philippe Crombé (UGent), Dr. Annelies Storme (UGent), Dr. Ewoud Deschepper en Dr. Gunther Noens.

IN DIALOOG MET BODEMS VELDBODEMKUNDE VOOR ARCHEOLOGISCH ONDERZOEK

BODEMKLEUR



AUTEURS : ROGER LANGOHR
CAROLE AMPE
JARI HINSCH MIKKELSEN

1. Inleiding

Kleur is één van de belangrijkste bodemkenmerken voor het bodemonderzoek. Het is het eerste kenmerk dat we zien en het is doorslaggevend om de bodemlagen en horizonen te onderscheiden. Zo spreekt men over de 'zwarte, bruine, rode of grijze laag' (figuren K1-K7).

Kleur is belangrijk:

- voor het herkennen van de opeenvolgende bodemhorizonten en -lagen en het bepalen van de grenzen tussen deze eenheden;
- als indicator voor de aanwezigheid van bepaalde organische en minerale kleurstoffen die op hun beurt dikwijls goede informatie geven over het bodemmilieu;
- voor de evaluatie van het bodemvochtregime, bijvoorbeeld de aan- of afwezigheid van oxido-reductievlekken;
- als indicator voor de degradatie van de humusstoffen, bijvoorbeeld lichter gekleurde vlekken;
- als indicator voor specifieke factoren die de bodem beïnvloeden, zoals hitte, bijvoorbeeld brandsporen.

Hoewel de bodemkleur een aanwijzing kan zijn voor bodemvormende processen, bodemcondities of de aanwezigheid van bepaalde stoffen in de bodem, moet men toch opletten voor foutieve interpretaties, zoals:

- rode bodems zijn niet altijd 'tropische' of 'oude' bodems. Hitte bijvoorbeeld kan een intense rood-gekleurde grond produceren zoals bij haarden of bij de productie van bakstenen. Rode bodems kunnen ook ontwikkeld zijn op gesteente dat van oorsprong rood is (figuren K8-K12);
- organische stoffen zijn niet altijd 'zwart', ze kunnen bruin, geel en zelfs kleurloos zijn (figuren K13-K15; K19; K20);
- een zwarte bodemkleur kan te wijten zijn aan heel andere stoffen dan humus, bijvoorbeeld de mineralen pyriet (figuur K28), mangaan (figuur K17), basaltzand (figuur K18) ook sporen van bepaalde schimmels of bepaalde korstmossen (figuur K16) geven een zwarte kleur;
- wat bruin is, is niet altijd toe te schrijven aan ijzer, bepaalde organische stoffen kunnen ook bruin zijn (figuur K19);
- groene bodems wijzen niet altijd op een anaerobe toestand, bijvoorbeeld bodems ontwikkeld in groene glauconietrijke tertiaire sedimenten zijn ook groenig (figuur K5).

Korrelgrootte speelt een belangrijke rol. Dezelfde hoeveelheid kleurstof zal een bodem sterker kleuren wanneer deze een grovere textuur heeft dan een bodem met een fijnere textuur. Zand, met een gemiddelde korrelgrootte van 200 μm heeft een oppervlakte die honderd keer kleiner is dan leem met een gemiddelde korrelgrootte van 20 μm . In het geval van de grovere textuur zal er dus minder kleurstof nodig zijn om dezelfde kleurintensiteit te bekomen dan in de bodem met de fijnere textuur.

82 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

Kleur is dikwijls het meest opvallende kenmerk van de bodem. Bodems vertonen een breed spectrum van rode, gele, grijze en zelfs blauwe of groene kleuren (figuren K1-K7)

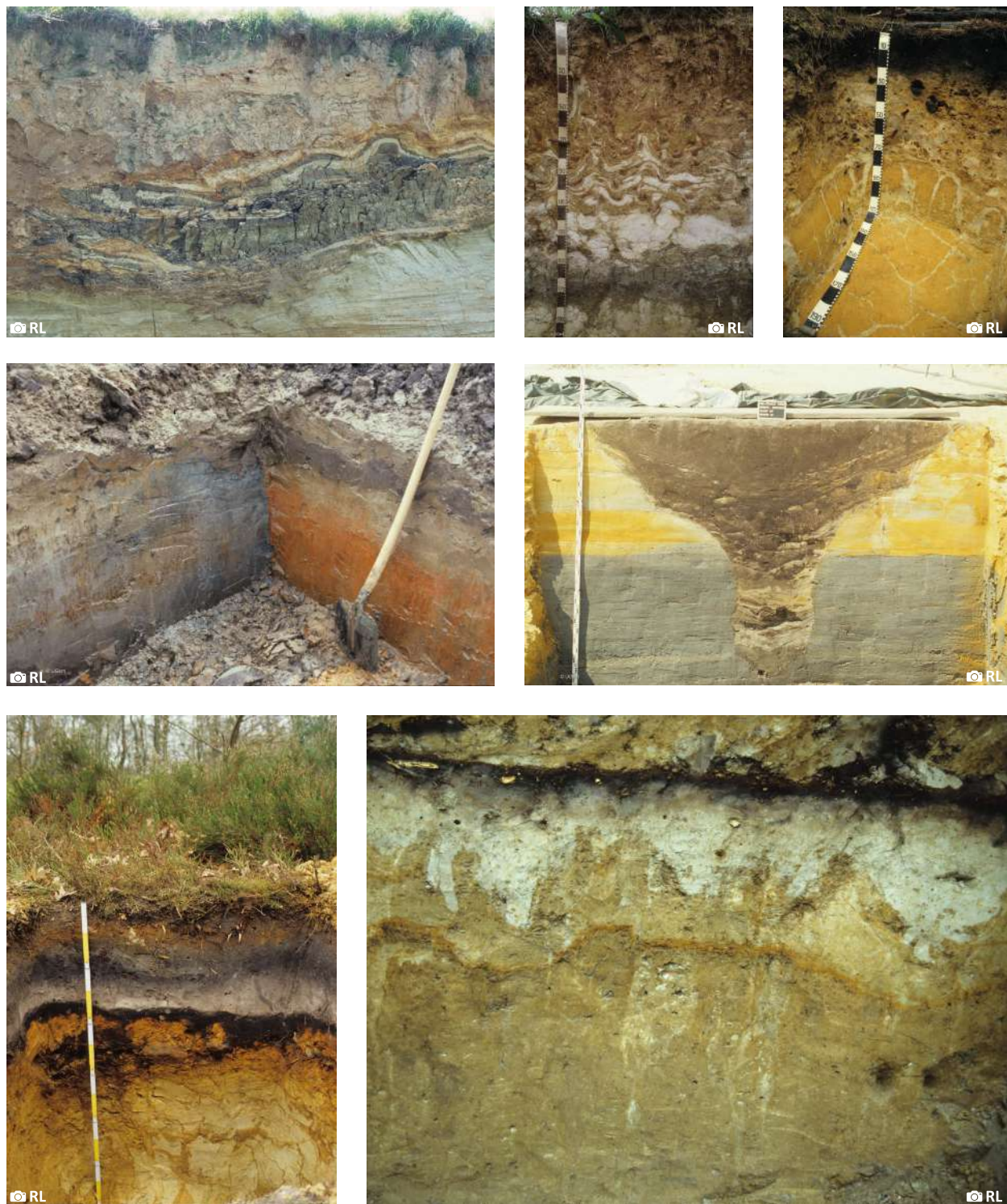


Fig. K1-K7: Kleur is een van de belangrijkste bodemkenmerken bij observaties, beschrijving en bemonstering.

Fig. K1: Gelifluctie van een kleilaag op zand. Kerkom, Boutersem, Vlaams-Brabant, België; fig. K2: Kryoturbatie in een leembodem. Atkár, Hongarije; fig. K3: Fragipan in lemig zand. Zoniënwood, België; fig. K4: Bodemprofiel in moerasgebied. Oudenaarde Donk, provincie Oost-Vlaanderen, België; fig. K5: Waterput doorheen zand en Kempense klei. Brecht, provincie Antwerpen, België; fig. K6: Podzol onder heide. Ten Haagdoornheide, Houthalen-Helchteren, provincie Limburg, België; fig. K7: Stagnogley op leem. Zoniënwood, België.

Rode bodems zijn niet altijd 'tropische' of 'oude' bodems. Het verhitten van de bodem geeft ook een rode kleur aan de bodem (figuren K8-K12)



Fig. K8: Bodem verhit door verbranding van een boomstronk. Pisa, Italië.



Fig. K9: Bovenaanzicht waarop de verbrande aarde van fig. K8 zichtbaar is. Pisa, Italië.



Fig. K10: Lokaal verhitte bodem door bosbrand. Noorwegen.



Fig. K11: Bodem met dikke roodbruine laag met baksteenfragmenten. Dion-le-mont, provincie Waals-Brabant, België.



Fig. K12: Verhitte bodem door het roosteren van ijzerzandsteen ter voorbereiding van een laagovenactiviteit. 5-20 cm: rode kleur door het verhitten van de bodem. 20-25 cm : de 'normale' bodemkleur. Zoniënwood, België. (Mees & Langohr, 2020).

Organisch materiaal kan veel verschillende kleuren aannemen (figuren K13-K15)



Fig. K13-K15: Tijdens de herfst werden de afgevallen bladeren van 11 verschillende boomsoorten bemonsterd. Vervolgens werden de bladeren gedurende 2 dagen in water gedompeld. Na 2 dagen werd het extract in flessen overgebracht. Het experiment toont aan dat de vrijgekomen opgeloste organische stoffen uiteenlopende kleuren hebben. Zoniënwood, België.

Deze stoffen blijven in de oppervlaktehorizont van de bodems waar ze geadsorbeerd worden door de colloïdale fractie (klei, humus). Het is slechts in zandbodems dat deze stoffen dieper in de bodem kunnen percoleren (zie figuur K19).

De zwarte kleur in de bodem is niet altijd te wijten aan de aanwezigheid van humus. Korstmossen (figuur K16), mangaanhuidjes (figuur K17) of zwart moeder materiaal zoals basaltzand (figuur K18) ge-

ven een zwarte kleur aan de bodem. Ook houtskool (figuur K23) en pyriet (figuren K28 en K29) kleuren de bodem zwart.



Fig. K16: *Verrucaria maura*, een soort zwarte korstmoss op gesteente. Ibiza, Spanje.



Fig. K17: Neerslag van zwarte mangaanhuidjes op een structuurvlak. Condroz, België.



Fig. K18: Zwart basaltzand. Hawaï, USA.

2. De oorsprong van bodemkleur

De variatie aan bodemkleuren is gebonden aan de aanwezigheid van velerlei stoffen. Drie groepen van bestanddelen zijn hier belangrijk:

Het mineraal bodemmateriaal

- **kwarts:** kan een bleke, eerder witte kleur hebben (figuren K19, K21, K22, K66, K69-K72, K78), zoals bijvoorbeeld in de Belgische kustduinen, in de uitlogingshorizont van podzols, in zandige bodems met sterke reductie;
- **basalt:** is donkergrijs tot zwart, zie bijvoorbeeld zwarte stranden op vulkanische eilanden zoals Nieuw-Zeeland of Hawaï (figuur K18);
- **glauconiet:** is in onverweerde toestand olijfgroen tot blauwgroen van kleur. Glauconiet is een mineraal dat in het kristalrooster veel ijzer bevat. Bij verwerking komen er veel ijzeroxides vrij die de bodem oranje- tot roestbruin kleuren. In deze bodems wijst de groene kleur niet op reductiecondities die vandaag actief zijn, maar is de kleur inherent aan het mineraal;
- **krijt:** is wit (figuur K20);
- **kalk:** is wit. Zie bijvoorbeeld kalkneerslag in een waterkoker. In België bevat de originele löss ongeveer 10 % kalk, daarom is de kalkrijke löss lichter gekleurd dan de ontkalkte löss.

Organische stoffen

- **humusstoffen** zijn colloïden, dit zijn deeltjes kleiner dan 1 à 2 µm. Ze zijn een belangrijke kleurstof in de bodem. Een bodem die uit 98 % wit kwartszand bestaat, kleurt grijs tot zwart met slechts 1 à 2 % humusstoffen. Een voorbeeld is een ploeglaag in de zandstreek (figuren K82, K83);
- in tegenstelling tot wat algemeen verwacht wordt (e.g. Schulze *et al.*, 1993, p.75) zijn de humusstoffen niet altijd zwart (figuur K20), ze kunnen ook bruinrood, bruin, geel, en zelfs kleurloos zijn (figuren K13-K15, K19);
 - hoe zwarter, hoe moeilijker voor de microbiologische activiteit om de humusstoffen te verteren omdat ze uit grote, compacte colloïden bestaan (figuren K20, K75, K76);
- **houtskool** is zwart (figuur K23);

- **veen** is bruin in een anaeroob milieu, dit wil zeggen onder een stilstaande permanente watertafel. Wanneer veen blootgesteld wordt aan de lucht, krijgt het door oxidatie een zwarte kleur. Dit is het geval wanneer veen in contact komt met een fluctuerende zuurstofrijke watertafel (figuren K21, K22). Na uitdrogen kan het veen opnieuw een bruine kleur krijgen (figuren K46-K48).

Ijzeroxiden en -hydroxiden. IJzer is de belangrijkste kleurstof in bodems

- De kleur varieert van geel tot dieprood in functie van:
 - het type van oxide of -hydroxide;
 - de grootte van de kristalvorm;
 - de concentratie van de stof;
 - de korrelgrootte (textuur) van de bodem.
- Ijzermineralen zoals bijvoorbeeld hematiet en goethiet zijn sterke kleurstoffen. Een bodem bestaande uit 98 % wit kwartszand krijgt een gele kleur door slechts 1-2 % vrij ijzer of ijzeroxides. Met vrij ijzer wordt bedoeld dat het ijzer niet gebonden is in het kristalrooster van bepaalde mineralen (figuren K61, K62, K66-K69, K75, K76, K78).

Wanneer ijzer vrijkomt bij verwerking van ijzerhoudende mineralen zoals bij verwerking van glauconiet of biotiet, is het ijzer meestal sterk gehydrateerd en heeft het eerder de bruine tot geelbruine kleur van goethiet (figuren K3, K5, K61, K62-H4). Naarmate de bodem verder evolueert zal dehydratatie plaatsgrijpen met vorming van hematiet met een uitgesproken rode kleur ('oude bodems') (figuren K24-K27). Tabel K1 geeft bij benadering deze evolutie aan (Schwertmann, 1993).

De meeste bodems in België hebben een geelbruine kleur (kleurtint (*hue*) 10YR). Dit is het gevolg van de aanwezigheid van gehydrateerd ijzer in dit relatief jonge bodemlandschap, de bodems zijn immers meestal jonger dan 15.000 jaar.

Bodems met een meer rode kleur (kleurtint 5YR of roder), wat wijst op de aanwezigheid van minder gehydrateerd ijzer (in extreem geval hematiet), komen voor:

- in zeer oude oplossingsholten van kalksteen (figuur K24);
- in relatief jonge bodems van het Ardens massief, maar ontwikkeld op hematiethoudend gesteente;
- in zeer oude verweringsbodems (figuren K25, K26) nog plaatselijk bewaard op het Ardens plateau (figuur K27);

Naam	Chemische samenstelling	Kleur (Munsell)	Kleur (beschrijving)	Voorkomen
Goethiet	$\alpha\text{-FeO(OH)}$	7,5YR tot 2,5Y; 10YR dominant	Bruin en geelbruin	Meest voorkomende ijzerhydroxide, in vele bodemtypes en klimaatcondities
Lepidocrociet	$\gamma\text{-FeO(OH)}$	5YR - 7,5YR, 6/8, 7/8	Oranje	In vlekken en concreties in waterverzadigde bodems
Ferrihydriet	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	5YR - 7,5YR	Roodbruin	In waterverzadigde bodem, meestal in de vorm van concreties
Hematiet	Fe_2O_3	7,5R - 5YR	Dieprood	Een ijzeroxide (geen hydratatie meer), oude bodems in warme klimaten (sterke verwerking van de mineralen), invloed van vuur (haarden, baksteen...)

Tabel K1: Evolutie van kleur en voorkomen van de belangrijkste ijzeroxiden en -oxyhydroxiden (Schwertmann, 1993).

- in bodems beïnvloed door vuur zoals bosbrand, haarden, roosteren van mineraal, productie van baksteen en/of dakpannen...(figuren K8-K12).

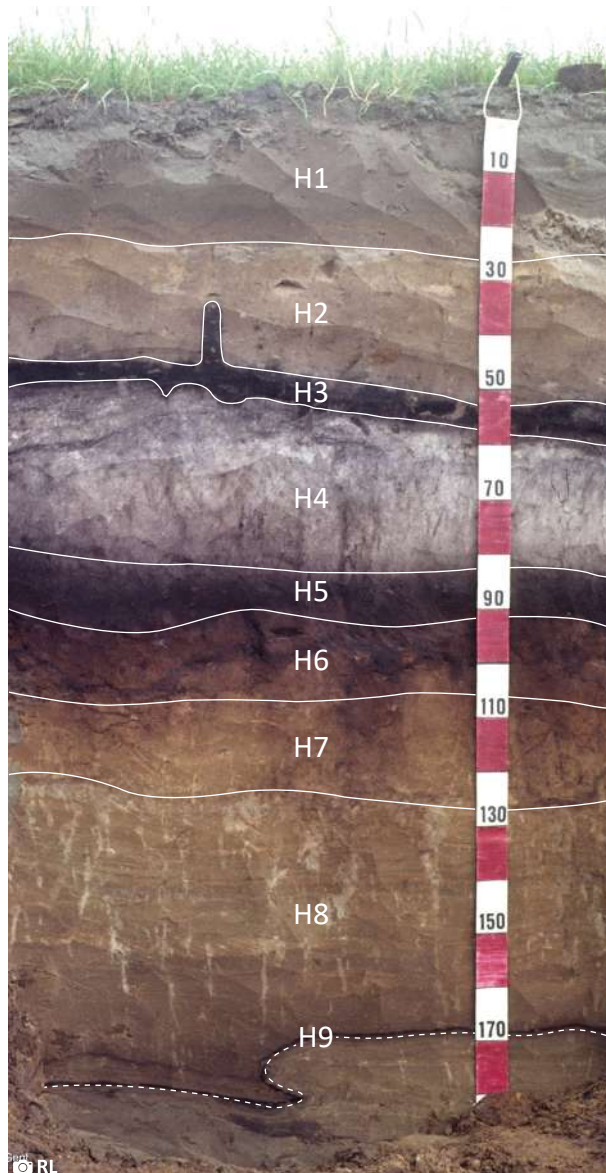
Andere bijzondere mineralen die een effect kunnen hebben op de bodemkleur:

- **pyriet**, een ijzersulfide (FeS_2) heeft, fijn verdeeld in een gereduceerde bodemmatrix, een zwarte kleur. Pyriet is aanwezig in zuurstofarme milieus zoals in moerassen, alluviale bodems, polderbodems, tertiaire kleien (figuren K28, K29);
- **jarosiet**, een ijzersulfaat ($\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$) heeft een strogele kleur (figuren K30-K32). Jarosiet wordt gevormd door de oxidatie van pyriet in een niet kalkhoudende bodem. Bij de vorming van jarosiet komt er ook zwavelzuur vrij wat resulteert in de vorming van een zeer zure bodem, de zogenaamde '*Acid sulfate soils*'. Jarosiet komt plaatselijk voor in diep begraven horizonten van alluviale bodems van de Belgische rivieren zoals bijvoorbeeld in de vallei van de Schelde en de Zenne;
- **gips**, een wit calciumsulfaat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Gips komt uitzonderlijk voor in kalkrijke bodems zoals in de polders. Het zwavelzuur dat vrijkomt bij de oxidatie van pyriet en de vorming van jarosiet, reageert met het aanwezige calcium, waardoor gipskristallen worden gevormd;
- **vivianiet**, een ijzerfosfaat ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), is wit in anaerobe condities en slaat zeer vlug blauw uit bij oxidatie (figuren K43, K54-K56). Dit mineraal wordt geassocieerd met veen, beerputten, oude kerkhoven en mesthopen, allemaal bronnen van fosfaten;
- **mangaanoxiden en -hydroxiden**. Ze komen voor in de bodem als secundaire concentraties in de vorm van bruine of zwarte concreties of nodules (figuur K73), als huidjes op structuurvlakken en poriënwallen (figuren K57, K58) of als korsten. Ze zijn dikwijls geassocieerd met ijzerhydroxiden (figuren K59, K60, K65). Het meest bekende mineraal is **pyrolusiet** (MnO_2).

Mangaan is donkerbruin tot zwart maar ook houtskool is zwart. Men kan ze in het veld van elkaar onderscheiden door ze met de vingers te pletten: houtskool verft de vingers veel meer dan mangaan. Met een eenvoudige veldtest met waterstofperoxide zal mangaan opbruisen, houtskool niet;

- ook **kleimineralen** kunnen een typische kleur hebben. Onder de zuivere kleimineralen, zonder geadsorbeerd ijzeroxide/hydroxide, kleurt:
 - glauconiet: groen,
 - illiet en smectiet: blauwachtig,
 - kaolinit: wit.

Organische stoffen in het bodemprofiel (figuren K19-K23)



H1: ^Ap; huidige ploeglaag.

H2: ^C; nivelleringslaag zonder bodemgenese.

H3: Ab; begraven originele zwarte humusrijke oppervlaktehorizont ontwikkeld onder bos.

H4: Eb; lichtgrijze uitlogingshorizont met sporen van vergane wortels.

H5: Bh(m)b; zwarte humusaanrijkhingshorizont, zwak gecementeerd.

H6: Bh(s)mb; donkerbruinrode humus-en zwakke ijzeraanrijkhingshorizont, matig gecementeerd.

H7: Bhb; bruine humusaanrijkhingshorizont.

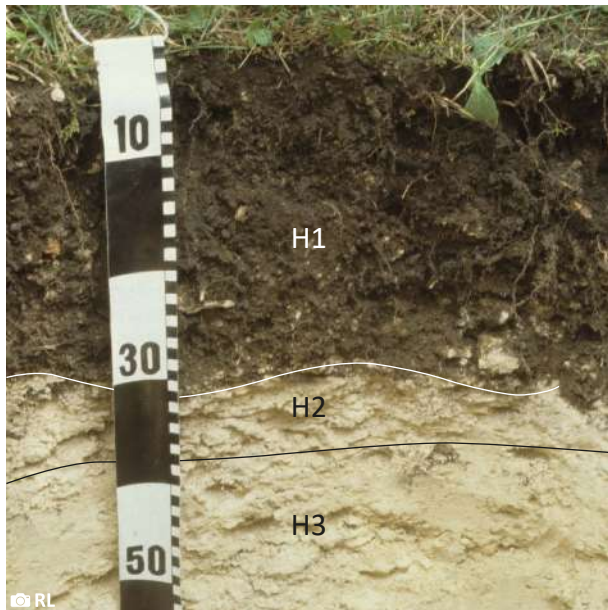
H8: BC(h)b; lichtolijfbruine humusaanrijkhingshorizont, gestratificeerd zand, de subverticale blekere tongen zijn oude biogalerijen.

H9: CBhb; zwart humusaanrijkhingsbandje van ongeveer 1 cm dik op het contact van de permanente grondwatertafel. Dit bandje heeft een onregelmatig verloop en volgt een oude periglaciale sediment-involutie.

Fig. K19: Humusstoffen en kleur. De textuur van het volledige profiel is lemig zand (textuurklasse S). Alle kleuren uitgezonderd H6, zijn te wijten aan humusstoffen.

H1-H2: Nivelleringslaag van een microduin. H3-H9: Podzolbodem ontwikkeld in laatglaciale dekzanden. Imperfect gedraineerde grondwaterpodzol.

Bijna alle kleuren van het podzolprofiel (H3-H9) zijn te wijten aan organische stoffen met kleurschakeringen gaande van zwart, bruinrood, bruin, lichtolijfbruin en zeer donkerbruin. De grijsbruine kleur van de ploeglaag (H1) is ook te wijten aan humusstoffen. De horizontsymbolen zijn uitgelegd in Mikkelsen *et al.*, 2022. Dekzandstreek, Aalter, provincie Oost- Vlaanderen, België.



H1: A; zwart, kruimelstructuur wegens sterke activiteit van wormen en talrijke wortels.

H2: Bw; krijt met een plaatstructuur. De plaatstructuur is gevormd door de vorst.

H3: C; krijt zonder bodemstructuur.

Fig. K20: Bodem ontwikkeld op krijt, een voorbeeld van een typische 'Rendzina' bodem. De zwarte kleur van de oppervlaktehorizont is te wijten aan een sterke accumulatie van humusstoffen gebonden aan kalk. De microbiologische activiteit kan deze calciumverzadigde humuscolloïden moeilijk verteren. Laon, Departement de l'Aisne, Frankrijk.



Fig. K21-K22: De zwarte veenlaag onderaan in het profiel is waterverzadigd. Fig. K22 is een detail van K21. Maatheide, Lommel, provincie Limburg, België.



Fig. K23: Bodemprofiel ter hoogte van een houtskoolbranderij. Bois de Grand-Leez, Gembloux, provincie Namen, België.

IJzer onder de vorm van hematiet geeft een dieprode kleur aan de bodem (figuren K24-K27)



Fig. K24: Oude bodems ontwikkeld door kalkoplossing. Oude namen: 'Terra Rossa', 'Rood-Mediterrane bodem'. Zuid-Frankrijk.



Fig. K25: Diepe verwerking van vulkanische as. Oude naam: 'Tropische' bodem. Hoogte van het profiel: 9 m. Dschang, Bamboutos, Kameroen.



Fig. K26: Diepe 'tropische' bodem op sterk verweerde vulkanische as. De geoxideerde ijzerrijke bodems (sterk rode kleuren) vertonen geen kleurverschil in functie van de vochtigheidsgraad. Dschang, Bamboutos, Kameroen.

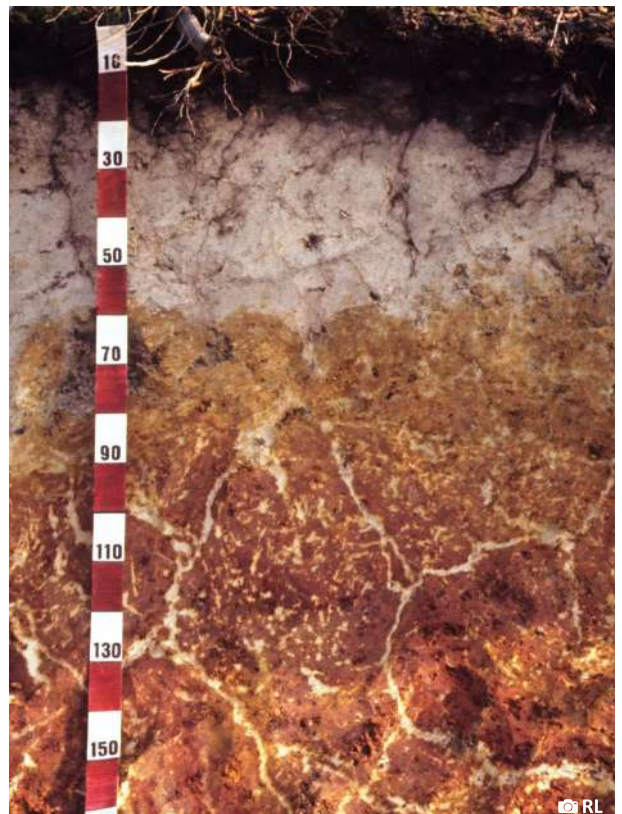
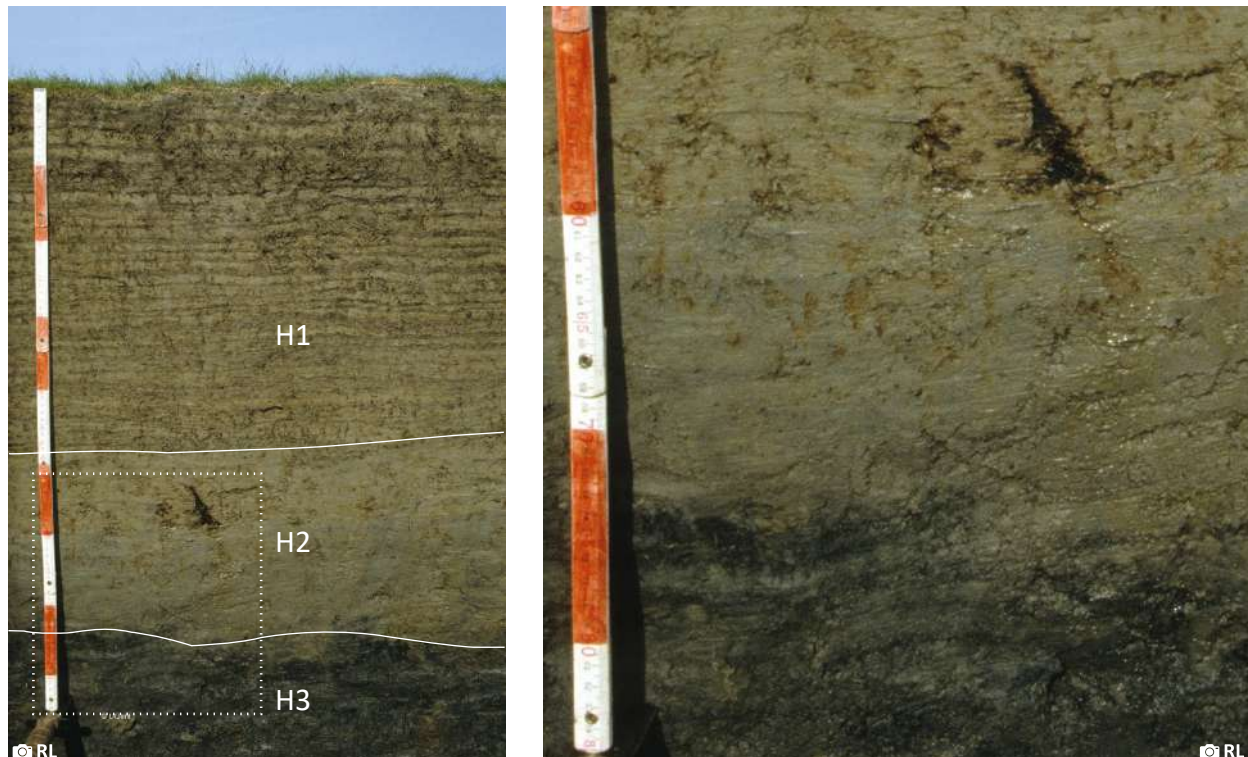


Fig. K27: Diep verweerde bodem. 15-60 cm: ontijzerd door stagnerende watertafel. 60-80 cm: gele kleur door hydratatie van de oorspronkelijke dieprode klei-aanrijkingshorizont. 80-180+ cm: dieprode kleiaanrijkingshorizont, kenmerkend voor een hematietkleur. Recht, Ardennen, provincie Luik, België.

Pyriet aanwezig in gereduceerde milieus, geeft een zwarte kleur aan de bodem (figuren K28-K29)



H1: A+Cl; gestratificeerd. Elke laag bestaat uit 2 componenten, als gevolg van een sterke overstroming: een paar millimeter dikke grijze humus-aangerijkte oppervlaktehorizont (A) van grasvegetatie afgewisseld met een centimeter dikke bleekgele sedimentlaag (Cl). Het geheel heeft roestvlekjes langs de graswortelgangen.

H2: Cl; bleekgroene horizont zonder stratificatie; roestvlekjes langs wortelgangen. H1 en H2: de wortelroest wijst op een fluctuerende grondwatertafel; het geheel is kenmerkend voor een 'gley' ('moerasbodem').

H3: Cr; zwarte horizont te wijten aan de aanwezigheid van pyriet wat wijst op een stagnerende permanente grondwatertafel.

Fig. K28-29: Pyriet in de bodem: bodemprofiel in een actieve alluviale vlakte. Onderaan in het profiel komt pyriet voor, kenmerkend voor een permanente grondwatertafel (bijvoorbeeld polders, alluvium). Alluviale vlakte, Elbe rivier, Hamburg, Duitsland.

Jarosiet gevormd in kalkloze alluviale sedimenten die pyriet bevatten (figuren K30-K32)

H1: A; oppervlaktehorizont aangerijkt met humusstoffen.

H2 en H3: fluctuerende grondwatertafel, hoekige blokstructuur.

H2: Bl1.

H3: Bl2; Jarosietaccumulatie met typische stro-gele kleur langs biogalerijen; gebonden aan oxidatie van pyriet in een kalkloos milieu (in een kalkrijke bodem zou gips gevormd zijn).

H4: permanente grondwatertafel, de zwarte accumulatie in biogalerijen is pyriet.

Geobserveerd o.a. in alluvium van de Schelde en van de Zenne.



Fig. K30-K32: Jarosiet in de bodem: bodemprofiel in een alluviale vlakte met kalkloze sedimenten. Nederland.

3. De naam van de kleur

Wanneer we aan verschillende personen zouden vragen om de kleur van een bodem te beschrijven, is de kans groot dat zij verschillende namen geven aan dezelfde kleur, zoals bijvoorbeeld bruinrood, donkerbruin, bordeaux, ... Voor een precieze communicatie onder collega's is een standaardisatie nodig. Om kleuren op een uniforme wijze te kunnen benoemen, werden voor de jaren 1930, in de Verenigde Staten een set van gekleurde bodemstalen uitgedeeld. Wereldwijd gebruikt men nu in de bodemkunde een standaard kleurenschaal om tot een eenvormige kleurbeschrijving te komen. Dit zijn de *Munsell Soil Color Charts* (Anonymous, 1954, Simonson, 1993) (figuren K33-K40) die ook gebruikt worden in andere natuurwetenschappen zoals de geologie en de plantkunde. Van de *Soil Color Charts* bestaat er ook een Japanse editie (figuur K35).

De Munsell code bevat drie componenten:

- *hue*: de dominante spectrale kleur of tint, dit houdt verband met de golflengte van het licht;
- *value*: de graad van helderheid gaande van donker (1) tot licht (8) of van zwart tot wit, dit is de hoeveelheid gereflecteerd licht;
- *chroma*: de zuiverheid, intensiteit of verzadiging van de spectrale kleur van bleek (1) tot intens (8).

De kleurkaarten zijn als een rechtstaand boek open-ge-slagen over 360°. Zo krijgt men een cilinder met een centrale as. De buitenrand van de bladzijden vormt het oppervlak van de cilinder (figuur K33).

De drie kleurcomponenten komen overeen met:

- de verschillende kleurkaarten die elkaar opvolgen volgens de kleuren van de regenboog, zijn de individuele kleurtint (*hue*) waarden;
- de centrale as, of y-as van elk blad, is de *value*, met zwart onderaan (*value* = 0) en wit bovenaan (*value* = 10);
- de horizontale as, of x-as, is de *chroma* of kleurintensiteit/verzadiging.

In de bodemkunde gebruiken we de kleurtinten (*hue*) gelegen tussen rood (R), geelrood (YR) en geel (Y), met waarden: 10R, 2,5YR, 5YR, 7,5YR, 10YR, 2,5Y, 5Y. Bovendien worden er een reeks bijzondere kleurschakeringen bijgevoegd die kenmerkend zijn voor bodems die zich in gereduceerde milieucondities bevinden (moerassen, mangroven, delta's, alluviale vlakten). Dit zijn de 'gley' kleuren met, onder andere, meer groene, blauwe of paarse kleurschakeringen (figuren K39, K41, K42).

Een code zoals 10YR 4/6 (figuur K40) heeft:

- 10YR=*hue*,
- 4/=*value*,
- /6=*chroma*
- De naam is 'donker geelachtig bruin'

Let op:

- Dezelfde naam wordt ook gebruikt voor 10YR 3/4, 10YR 3/6 en 10YR 4/4, er kunnen dus meerdere chips zijn met dezelfde kleurnaam;
- In de Japanse *Soil Color Chart*, die officieel natuurlijk niet 'Munsell' heet, zijn de kleurbenamingen voor deze code verschillend! Voor 10YR 4/6 is de beschrijving hier 'bruin'.

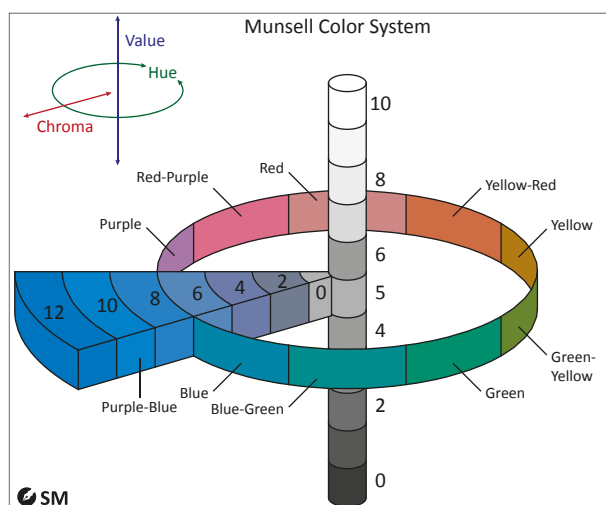


Fig. K33: Het principe van het Munsell kleurenkaarten systeem voor het meten van de bodemkleur: de positie van een specifieke kleurkaart is de individuele tint (*hue*), de centrale as stelt de wit-zwart gradiënt voor (*value*), de horizontale as de kleurintensiteit (*chroma*). (bron: https://en.wikipedia.org/wiki/Munsell_color_system).

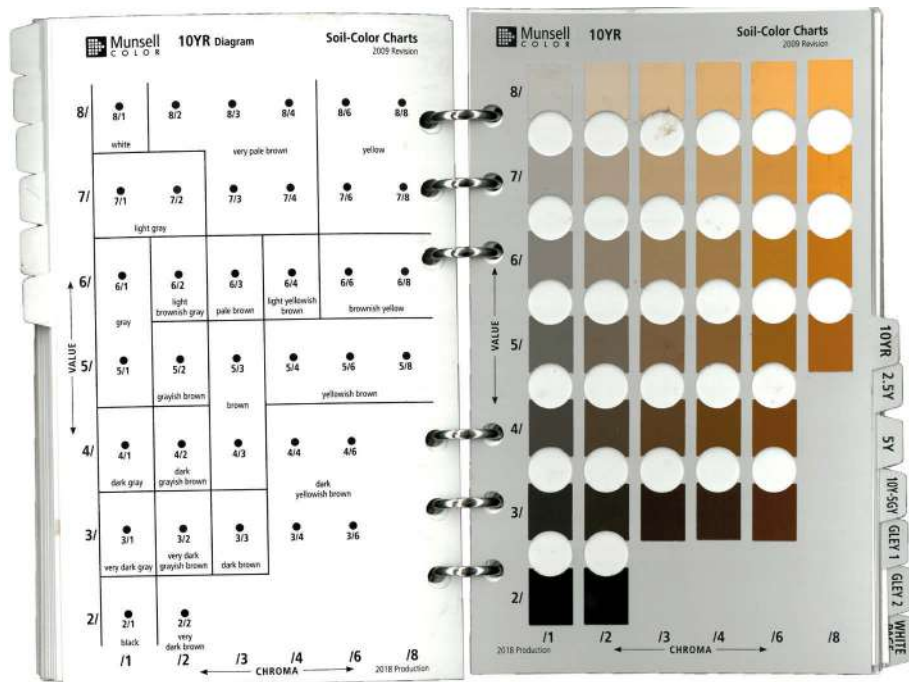


Fig. K34: Amerikaanse *Munsell Soil Color Charts*.

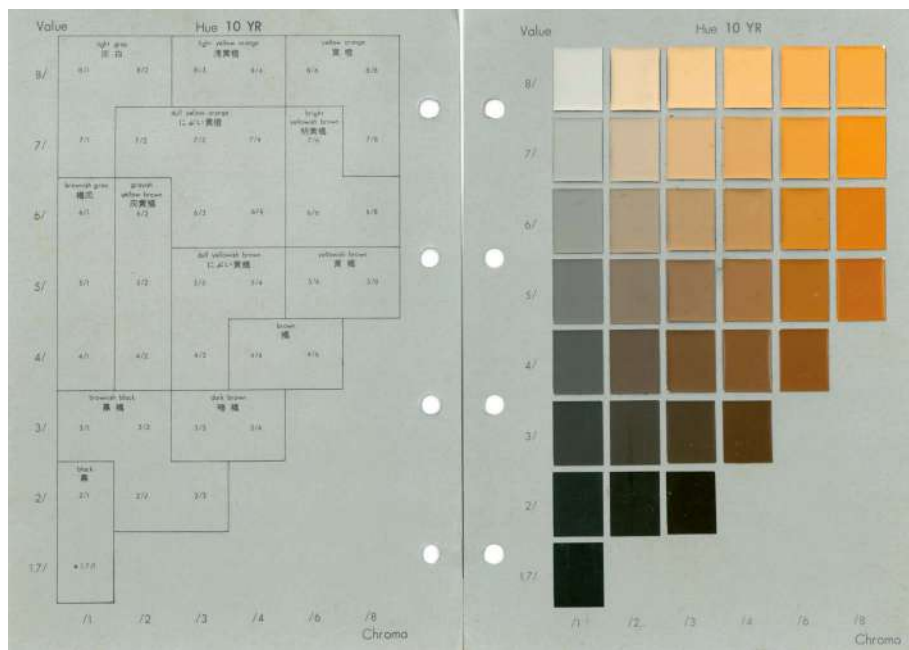


Fig. K35: Japanse *Soil Color Charts*.

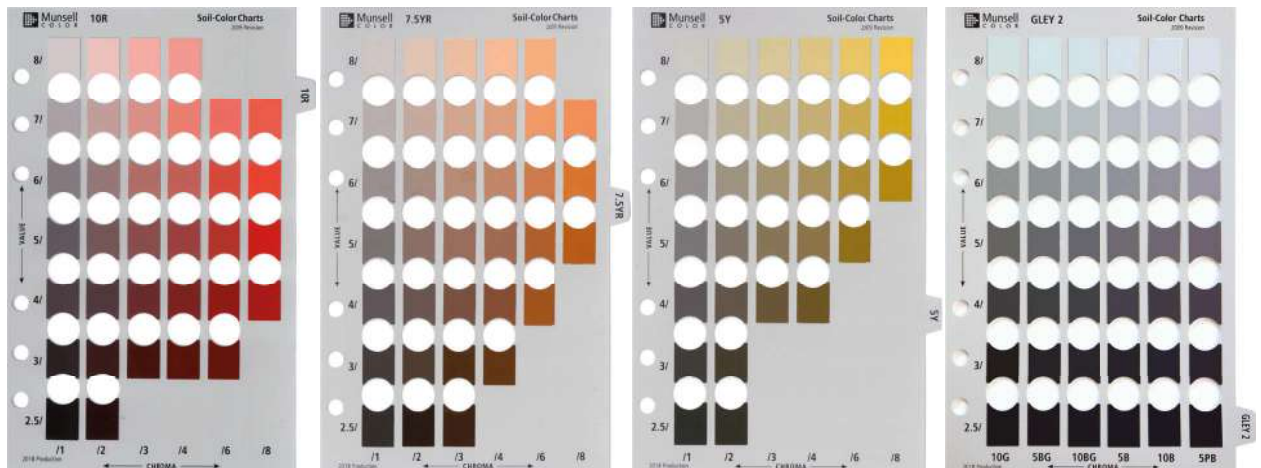


Fig. K36-K39: De belangrijkste pagina's uit de *Munsell Soil Color Charts* voor bodemkundig onderzoek zijn 10R, 7,5YR, 10YR en 5Y. Detail van de kleurkaarten 10R, 7,5YR, 5Y en gley kleuren voor gereduceerde (anaerobe) bodems.

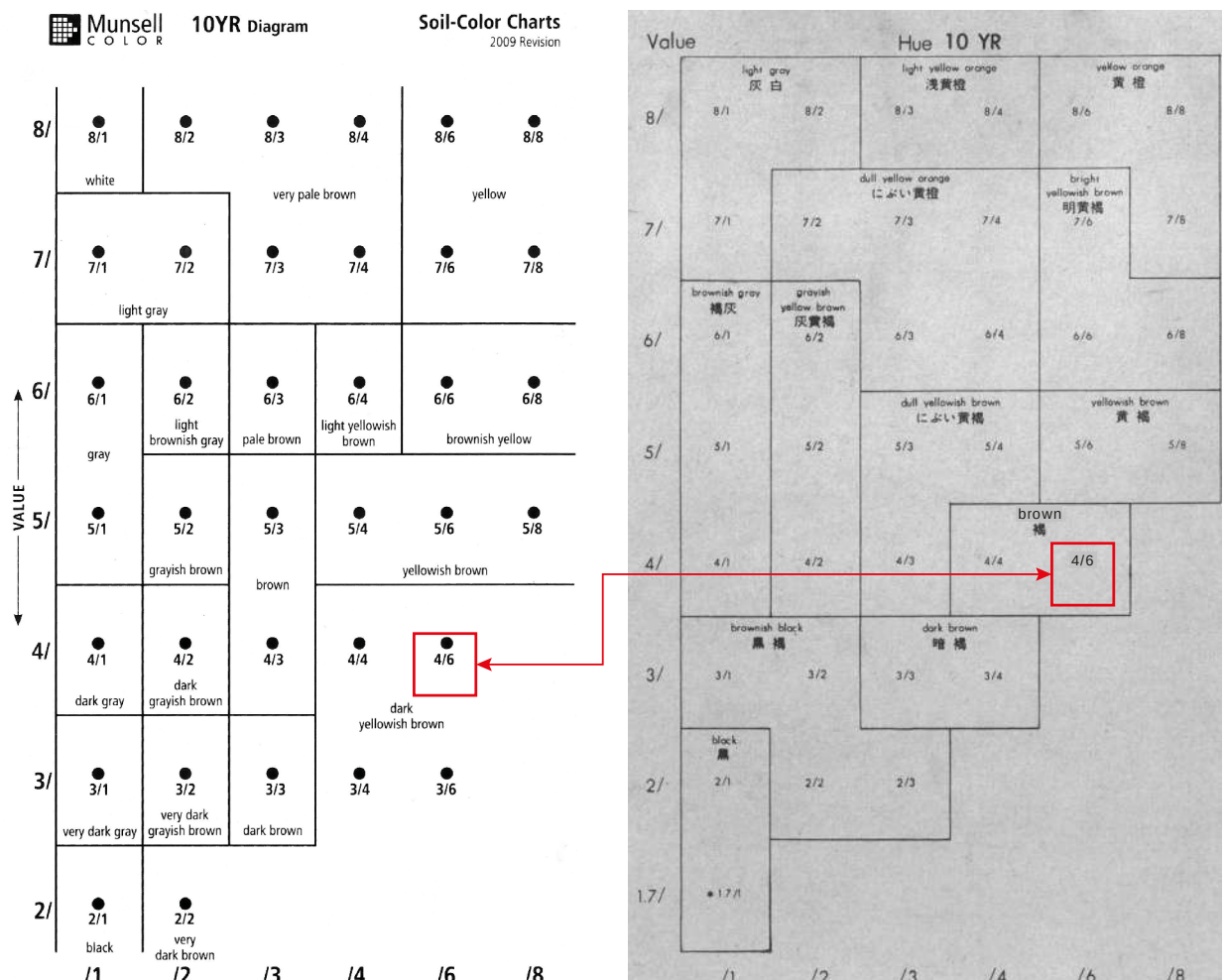
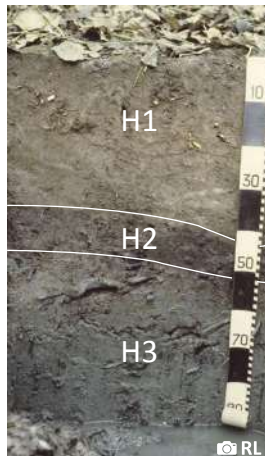


Fig. K40: Vergelijking van de kleurnaamgeving voor de 10YR *Munsell Soil Color Chart* en de Japanse *Soil Color Chart*.

Gleykleuren in de bodem (figuren K41-K43)

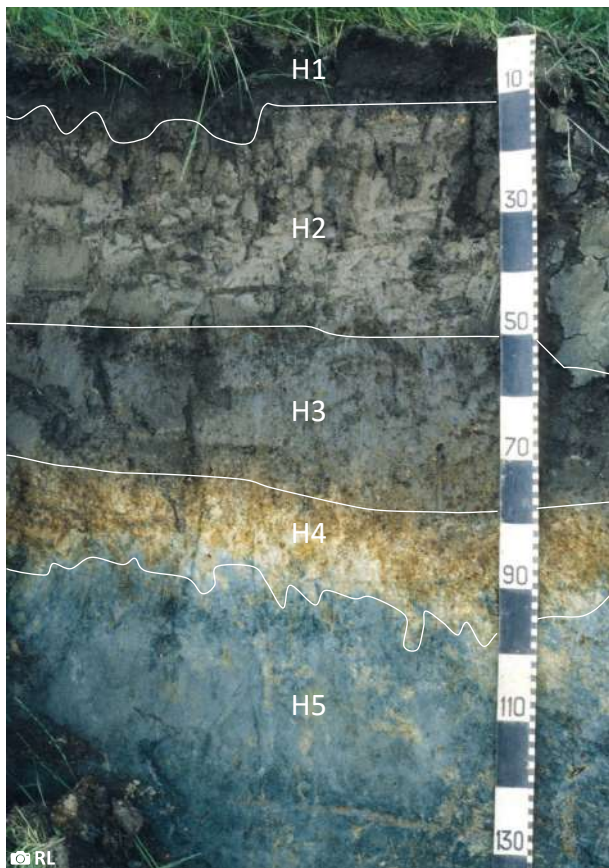


H1: Cl; grijs recent kalkhoudend alluvium, licht gereduceerd.

H2: Al; humusrijke oppervlaktehorizont van begraven bodem.

H3: Br; grijsblauw kalkhoudend sediment, sterk gereduceerd in een stagnerende permanente grondwattafel.

Fig. K41-K42: Gleykleuren in het bodemprofiel in een moerasgebied van het Zoniënwood. Rood Klooster, Zoniënwood, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België.



H1: A; huidige humusrijke oppervlaktebodem.

H2: Ag1; humusrijke lemige horizont, licht gereduceerd.

H3: 2Ag2; kleirijke horizont, humusrijk, met weinig vivianiet.

H4: 3Bcg; iets grovere textuur, ijzeraccumulatie met talrijke concreties.

H5: 4Bg; kleirijke horizont waarin accumulatie van vivianiet veel voorkomt.

Fig. K43: Bodemprofiel gegraven in de alluviale vlakte van de Schelde. Een complexe alluviale bodem met sedimentlagen van verschillende texturen die sterk evolueren door bodemgenese, met onder andere, productie van organische stoffen die accumuleren, intensieve bioturbatie door plantengroei, migratie en neerslag van oplosbare stoffen. Oudenaarde Donk, provincie Oost-Vlaanderen, België.

4. Hoe kleur meten

Bodemkleur kan verschillen naargelang de vochtigheidsgraad van de bodem (figuren K44, K45). Men is dan ook verplicht de vochtigheidsgraad te vermelden waarbij de kleur is beschreven.

Traditioneel gebruikt men hier het concept van 'vochtig' (ongeveer op veldcapaciteit) en 'droog' (= luchtdroog). Het is slechts in geoxideerde ijzerrijke bodems met rode kleuren dat er geen kleurverschil optreedt tussen droge en vochtige bodems (figuur K26).

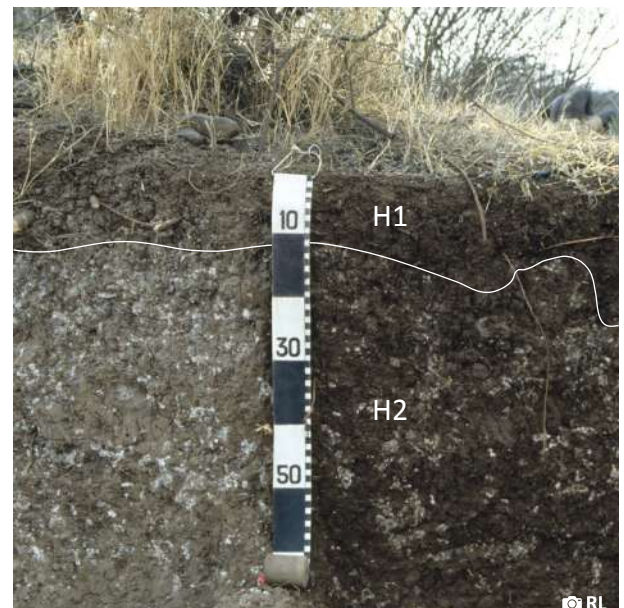
De *in situ* matrixkleur en de geknede bodemkleur kunnen verschillen. Dit verschil kan te wijten zijn aan de aanwezigheid van *coatings* (huidjes) op de structuurvlakken. Deze *coatings* kunnen bestaan uit organische colloïden (figuren K49-K51), bruine kleicolloïden, mangaan ... Bij het kneden van de bodem worden de huidjes vermengd en uitgesmeerd over een groter oppervlak van de bodemkorrels zodat de algemene kleur meestal bleker wordt.

De bodemkleur kan ook veranderen bij het graven van een sleuf. Dit is vooral belangrijk voor bodems die zich in permanente reducerende milieucondities bevinden zoals in een moeras, onder een vloer, een weg, in de permanente grondwatertafel (figuren K52, K53).

Voorbeelden:

- een lichtgroenachtig-grijze bodem wordt door blootstelling aan de lucht rood door de oxidatie van het aanwezige gereduceerde ijzer (figuur K53);
- een lichtgrijze bodem krijgt door oxidatie van het aanwezige vivianiet (een ijzerfosfaat) een blauwe kleur (figuren K43, K54-K56).

De vochtigheidstoestand kan een groot effect hebben op de bodemkleur (figuren K44-K48)



H1: A; ontkalkte oppervlaktehorizont.

H2: Bk; goed gestructureerde kleirijke horizont met talrijke kalkconcreties die oude biogalerijen opvullen.

Fig. K44: Een bodemprofiel met talrijke secundaire kalkconcreties (witte vlekken).

De vochtige toestand (rechts) is duidelijk donkerder in vergelijking met de droge toestand (links). Kapthurin Formation, Baringo, Rift, Kenia. (Langohr & Pieters, 1990).



Fig. K45: Een oppervlaktehorizont met een sterk kleurcontrast tussen de droge (links) en vochtige (rechts) toestand. Dit contrast is kenmerkend voor bodems met redelijk veel organische stof (humus) en weinig ijzer. Rotselaar, provincie Vlaams-Brabant, België.



Fig. K46 (0-120 cm) met een detail in K47 (90-120 cm): Permanent waterverzadigd veen wordt zwart door oxidatie. Dieper dan 120 cm is het niet geoxideerd veen, bruin. Biberkessel, Zwarte Woud, Duitsland. Fig. K48: (0-100 cm): uitgedroogd veen is bruin. Dieper dan 100 cm is het sterk verteerd veen zwart. Denemarken.

Bij het kneden van de bodem kan de kleur veranderen (figuren K49-K51)



Fig. K49: Bodem ontwikkeld in vulkanische as. Rangitatu, Nieuw-Zeeland.

Fig. K51: De rechtse helft van de foto toont een detail van de subhoekige bodemstructuur. Op de linkse helft ziet men de structuur na het kneden van de bodem. Het uitgesproken kleurverschil is te wijten aan continue *coatings* (huidjes) van organische stof op de aggregaten. Het bodemmateriaal is afkomstig van de bodem op fig. K49.



Fig. K50: Detail van fig. K49 tussen 15-25 cm. Een strook links is afgeschaapt en vertoont een sterk kleurencontrast met de bodemkleur van de matrix. De afgeschaapte kleur lijkt sterk op de bodemkleur vanaf ongeveer 55 cm diepte.



Kleurveranderingen van ijzer en vivianiet in het bodemprofiel door blootstelling van de bodem aan de lucht (figuren K53-K56)



Fig. K52: In moerasgebieden met veel organische stof en stagnerend water, kan de waterverzadigde bodem volledig anaëroob zijn (afwezigheid van zuurstof).



Fig. K53: Bodemprofiel in een moerasgebied. Linkerwand: origineel profiel; grijze en blauwe kleuren te wijten aan ijzer in gereduceerde vorm (Fe^{2+}). Rechterwand: na enkele tientallen minuten blootstelling aan de lucht is het ijzer geoxideerd (Fe^{3+}) en krijgt de bodem een roestkleur. Oudenaarde Donk, provincie Oost-Vlaanderen, België.

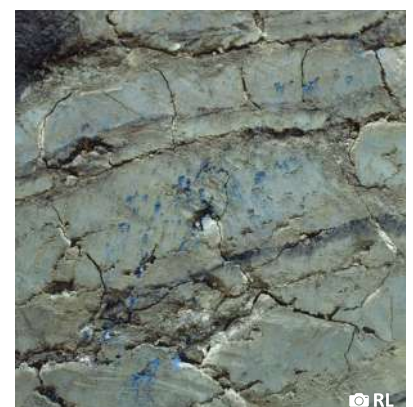


Fig. K54-K56: De Motte van Werken. Fig. K54: Op de plaats waar later de motte opgeworpen werd, stond er vroeger een boerderij met vee dat de bodem vertrappelde (zie fig. K55). Dit veroorzaakte compactie van de bodem, waardoor de porositeit verminderde en de bodem sneller waterverzadigd werd. Hierdoor raakte de bodem in reductietoestand zodat ijzer mobiel werd. Dit gereduceerd ijzer reageerde met fosfaat afkomstig van excrementen en urine, waardoor zich vivianiet (een ijzerfosfaat) vormde. Op plaatsen waar het migrerend ijzer terug oxideerde, sloeg het vivianiet neer. Vivianiet is blauw gekleurd in geoxideerde toestand (fig. K56), gereduceerd is het wit. (Langohr, 1991; Gebhardt & Langohr, 1996, 1999). Werken, provincie West-Vlaanderen, België.

5. Kleurvlekken

Gevlekte bodemhorizonten en -lagen komen heel dikwijls voor in bodems met een ondiepe watertafel.

Een aantal kenmerken van de vlekken zijn belangrijk om te registreren (figuren K69-K80):

- de kleur van de vlekken en het kleurcontrast tussen de vlekken en de matrix,
- het aantal,
- de grootte,
- de vorm,
- de scherpte van de grens tussen de vlek en de bodemmatrix,
- de samenstelling van de matrix en de vlekken,
- de plaats van de vlekken in de bodemmatrix (geassocieerde kenmerken).

Verscheidene processen zijn verantwoordelijk voor de genese van kleurvlekken: oxido-reductie van ijzer, kleimigratie en -accumulatie en microbiologische vertering van humusstoffen:

- Veel vlekken ontstaan door migratie en neerslag van ijzer, de belangrijkste kleurstof in bodems. Dit gebeurt door het proces van oxido-reductie. Wanneer plaatselijk een anaerobe toestand aanwezig is, wordt ijzer gereduceerd. In gereduceerde vorm is ijzer oplosbaar en kleurloos waardoor het kan migreren. Indien elders zuurstof voorkomt, zal dit ijzer opnieuw oxideren en neerslaan (figuren K61-K64). Een voorbeeld is het ontstaan van een roestrand langsheen wortels die zuurstof afstaan in een water-verzadigd milieu (figuren K63-K69, K72).
- Kleimineralen in de bodem hebben meestal een bruine kleur door de adsorptie van ijzer (Fe^{3+}) op de negatief geladen kleideeltjes. Wanneer de kleicolloïden dispergeren, dit is het geval bij een pH of zuurtegraad van 5,0 – 6,5, kunnen deze migreren waardoor er een lichter gekleurde vlek ontstaat. Waar de klei flocculeert, komt er een iets bruinere zone voor (zie thema 'Organische en minerale (klei) colloïdenmigratie'). In tegenstelling tot het oxido-reductie proces van ijzer zijn de lichter gekleurde vlekken hier niet geassocieerd met een roestrand (figuur K2).

- Humusaangerijkte horizonten kunnen lichter gekleurde vlekken vertonen die te wijten zijn aan de microbiologische vertering van organische stoffen. De vlekken hebben een min of meer sferische omtrek. Zelfs de zwarte gecementeerde humusaccumulaties van sommige podzolbodems, die nochtans de reputatie hebben om heel stabiel te zijn, kunnen aangetast worden. De microbiologische vertering is te wijten aan de recente stikstofrijke luchtpollutie (stikstofoxiden en ammoniak) afkomstig van de transportsector en de hedendaagse intensieve landbouw. De toevoer van stikstof activeert de microbiologische activiteit die verantwoordelijk is voor de ontbinding van de humusstoffen (figuren K75-K83). In andere bodems is deze microbiologische vertering van humusstof actief langsheen galerijen waar oude wortels ontbinden.

Deze microbiologische vertering van humusstoffen kan plaatselijk een 'degradatie' veroorzaken van archeologische bodemkenmerken zoals bijvoorbeeld een begraven ploeglaag die oorspronkelijk goed waarneembaar was dankzij de donkere kleur (figuren K79-K81) en nu langzamerhand aan het vervagen is.

Er bestaan talrijke parameters voor de beschrijving van vlekken ('*mottling*') zoals kleur, componenten, contrast, vorm, aantal, grootte, plaats (Mikkelsen *et al.*, 2022). Figuren K69 tot K73 zijn voorbeelden van ijzer- en/of mangaanvlekken door het oxido-reductieproces.

Ijzer en mangaan kunnen migreren in de bodem door het oxido-reductieproces (figuren K57-K69)

H1: Ap; ploeglaag.

H2: Bw; lichtbruine verweringshorizont.

H3: Bwl; verweringshorizont met vlekken is te wijten aan een fluctuerende grondwatertafel. De reductieomstandigheden zijn zwak waardoor ijzer weinig migreert. Mangaan migreert meer met de vorming van mangaanhuidjes (*coatings*) op grote structuurvlakken. K58 is een detail van K57.

Fig. K57-K58: Bodem met een tijdelijke grondwatertafel. Condroz, provincie Namen, België.

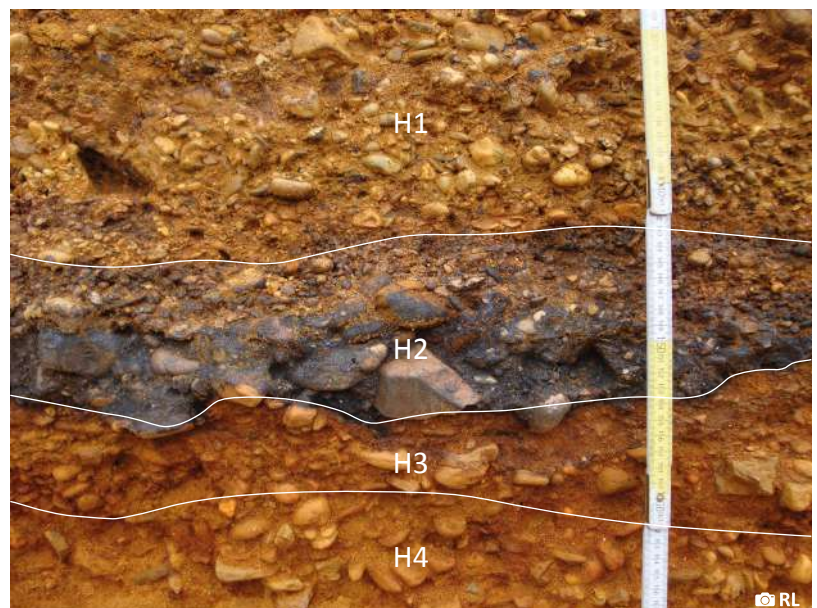
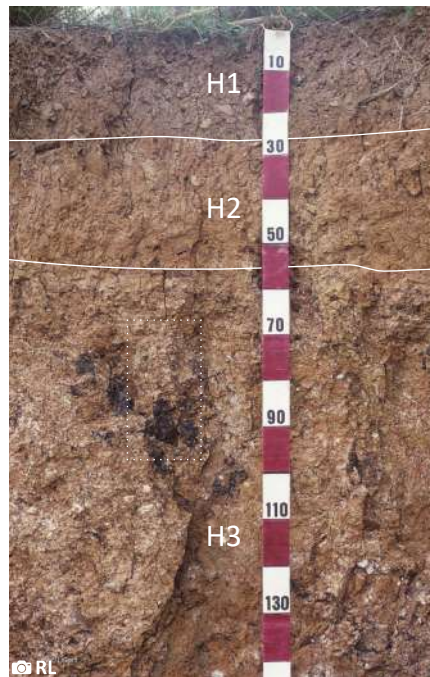
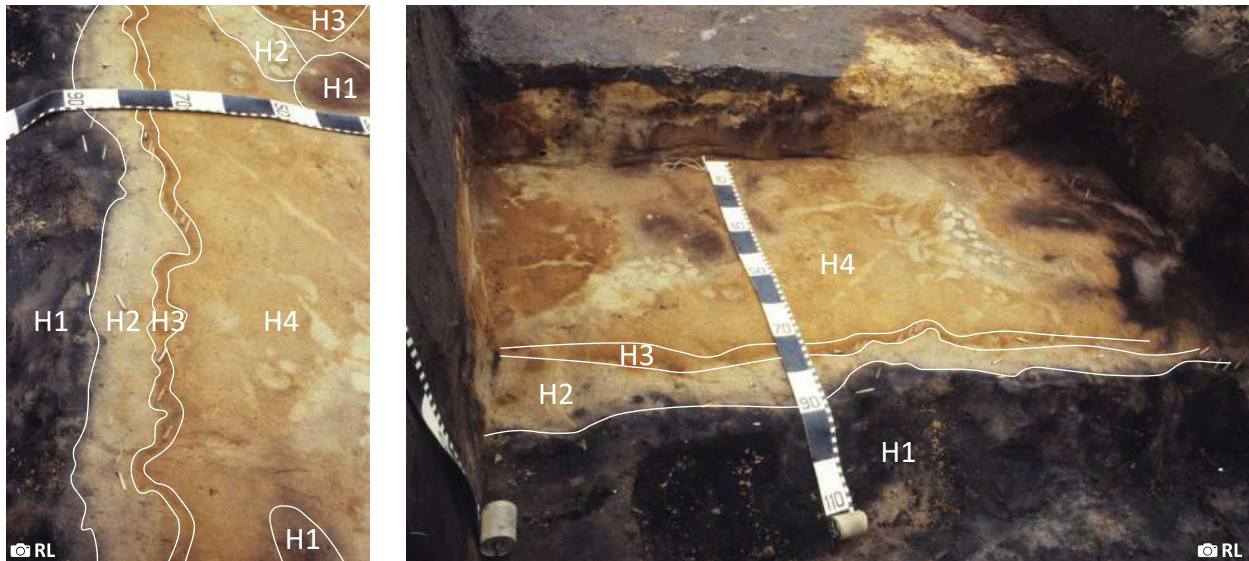


Fig. K59-K60: Fluvioglaciale afzettingen. De accumulatie van mangaan en ijzer verwijst naar een periode met een permanente grondwatertafel ter hoogte van H4. Het grondwater bevatte opgelost ijzer en mangaan dat neersloeg door oxidatie op het contact met H1. Deze hypothese steunt op het feit dat mangaan (H2) meer oplosbaar is dan ijzer (H3), waardoor het verder naar boven migreert dan het ijzer. Maasterras, provincie Limburg, België.



H1: de rand van een gracht met een zwarte humusrijke vulling. H2-4: de zandbodem. H2: door de infiltratie van reducerend grondwater vanuit de humusrijke gracht is een eerste zone van de bodem ontijzerd. Dit ijzer slaat iets verder neer (oxideert) waar meer zuurstof aanwezig is (H3). H4: de normale bodem. H2 en H3 zijn bodemkenmerken geassocieerd met de archeologische structuur.

Fig. K61-K62: Het horizontaal vlak toont de bodemkenmerken geassocieerd met de archeologische structuren van een Romeins kamp met grachten op de site Maldegem-Vake, provincie Oost-Vlaanderen, België.

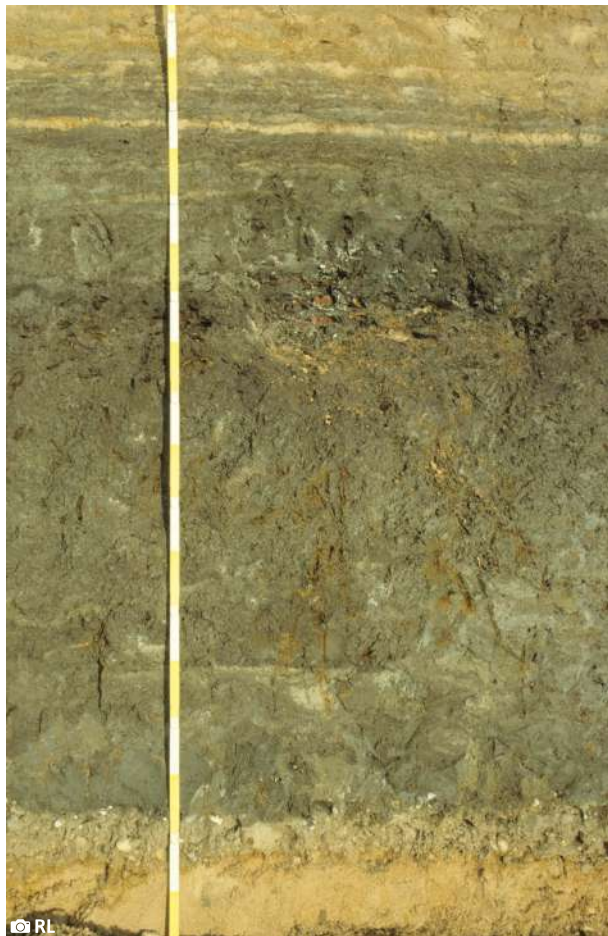


Fig. K63: Kleirijke alluviale bodem met permanente grondwartertafel, begraven onder recent alluvium. Alluviale vlakte van de Moezelrivier, Remerschen, Groothertogdom Luxemburg.

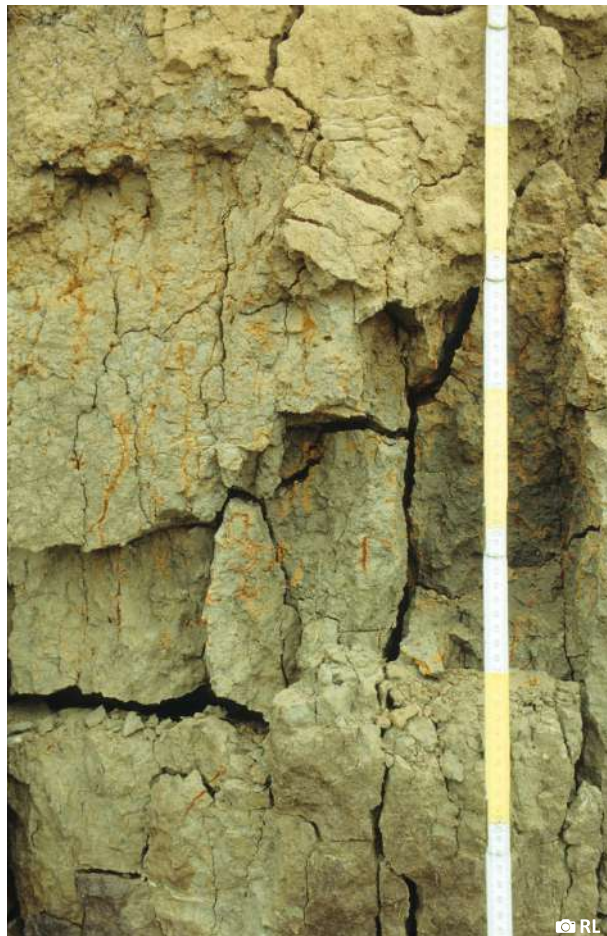


Fig. K64: Detail van de prismastructuur, met sporen van ijzeroxidatie in de wortelgalerijen, te zien als roestbruine streepjes.



Fig. K65: Detail van neerslag van zwart mangaan op het structuurvlak en geoxideerd ijzer in de wortelgalerijen. De zuurstoftoevoer gebeurt door wortels van planten die gedijen in moerascondities. Alluviale vlakte van de Moezel, Remerschen, Groot Hertogdom Luxemburg.



Fig. K67: Cilindervormige ijzerconcreties langs oude wortelgangen. Kustduinen, Wimereux, departement Pas-de-Calais, Frankrijk.



Fig. K66: IJzeroxidatie langs de wortels in de permanente grondwaterzone. Kustduinen, provincie West-Vlaanderen, België.

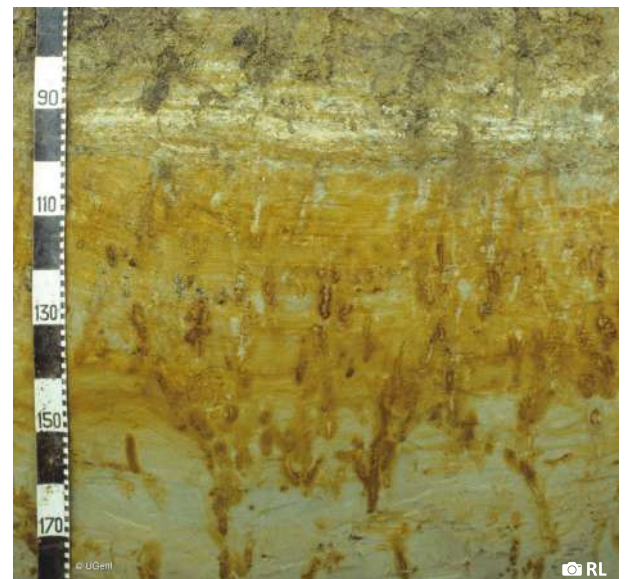


Fig. K68: Kleirijke alluviale bodem met een permanente grondwater tafel, die begraven is onder recent alluvium. IJzerneerslag langs talrijke wortelgalerijen. Zomergem, provincie Oost-Vlaanderen, België.

Vlekken van ijzer en mangaan gevormd door het oxido-reductieproces kunnen veel vormen aannemen (figuren K69-K74)



Fig. K69: Horizontaal vlak van een bodem vergelijkbaar met die van Fig. K68. De U-vormige ijzerneerslag is het gevolg van een laterale grondwaterbeweging van links bovenaan naar rechts onderaan. Vlaams natuurreservaat De Westhoek, De Panne, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. K70: IJzer (roestbruine vlekken) en een beetje mangaan (zwarte vlekken). Oudenaarde Donk, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. K71: IJzer en een beetje mangaan.
Fig. K71-K73 Oudenaarde Donk, provincie Oost-Vlaanderen, België;



Fig. K72: IJzer geassocieerd aan oude wortelgangen.



Fig. K73: Voorbeeld van een hoge hoeveelheid aan mangaanvlekken.

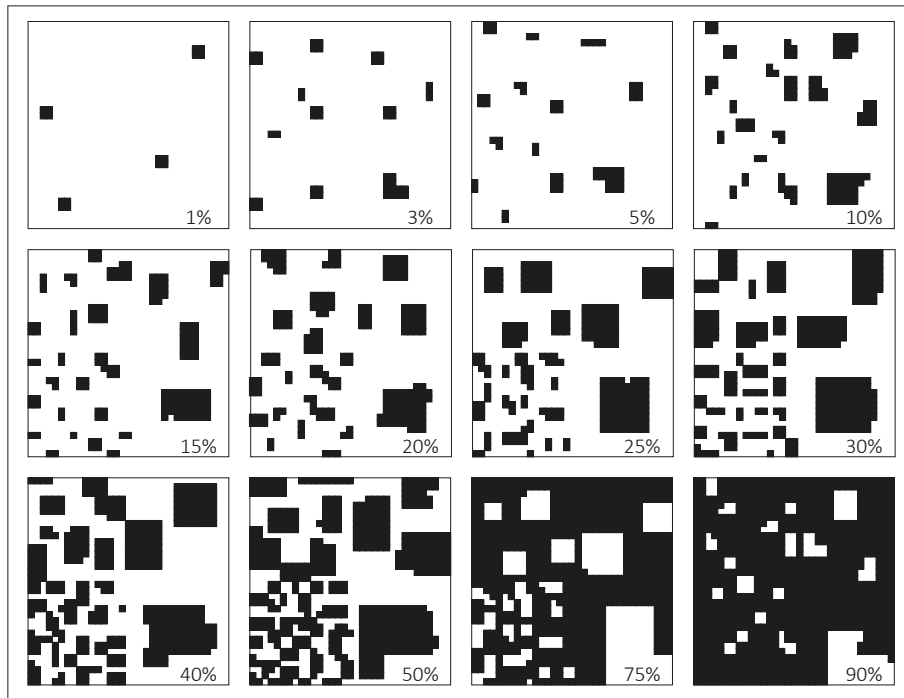
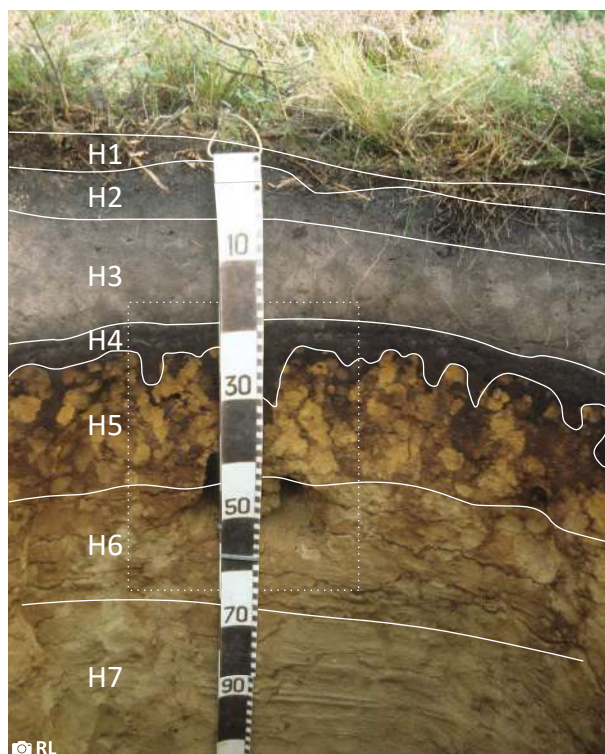


Fig. K74: Tabel voor bijvoorbeeld het inschatten van het oppervlaktepercentage van vlekken. (FAO, 2006). 

Vlekken kunnen het resultaat zijn van microbiologische consumptie van organisch materiaal (figuren K75-K83)

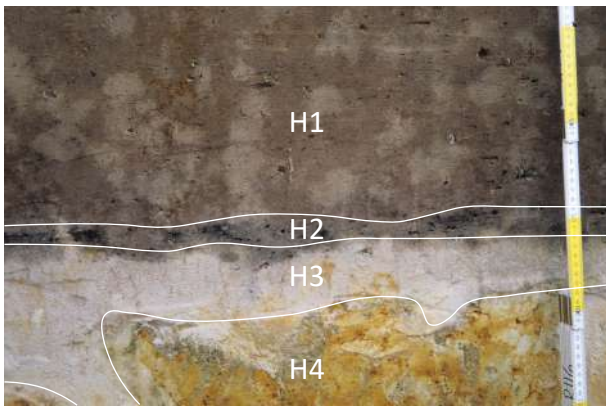


H1: O; strooisellaag van gras en heide.
H2: A; horizont aangerijkt aan humusstoffen.
H3: E; ijzer-uitlogingshorizont.
H4: Bh(m); humusaanrijking, licht gecementeerd.
H5: Bhs; humus- en ijzeraanrijking. In meer dan 50% van de



horizont is de humus verteerd door microbiologische activiteit waardoor de gele ijzeraanrijking meer uitgesproken wordt.
H6: Links van het lint: Bh, humusinfiltratie gedeeltelijk verteerd door microbiologische activiteit.
H7: Rechts van het lint: C, origineel nog gestratificeerd zand.

Fig. K75-K76 (detail): Een ijzer-humuspodzol met microbiologische consumptie van humusstoffen in de vorm van vlekken. Hjerlheide, Noord-Jutland, Denemarken. (Nielsen *et al.*, 1987).



H1: De originele humusaanrijking is sterk gevlekt door microbiologische humusconsumptie.

H2: Resten van een planken vloer.

H3: E; witte ijzeruitlogingshorizont gevormd als gevolg van een reductiemilieu in de stalbodem toen die nog in gebruik was.

H4: IJzeraanrijking vanuit de bovenliggende horizont. H3 en H4 zijn geassocieerde bodemkenmerken met de archeologische structuur (oxido-reductie van ijzer).

Fig. K77-K78: De site Brecht Zoegweg, een Romeinse potstal met aanvankelijk een homogene humusaanrijking. Brecht, provincie Antwerpen, België. (Mikkelsen *et al.*, 2002, 2019).

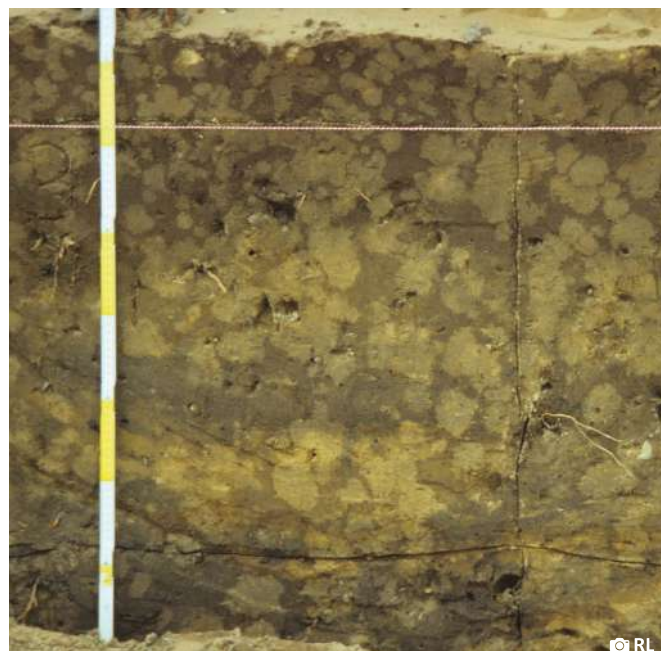


Fig. K79-K80: Gracht gevuld in 2 fasen rijk aan humusstoffen die sterk zijn aangetast door microbiologische activiteit (bleke vlekken). Djursland, Jutland, Denemarken.

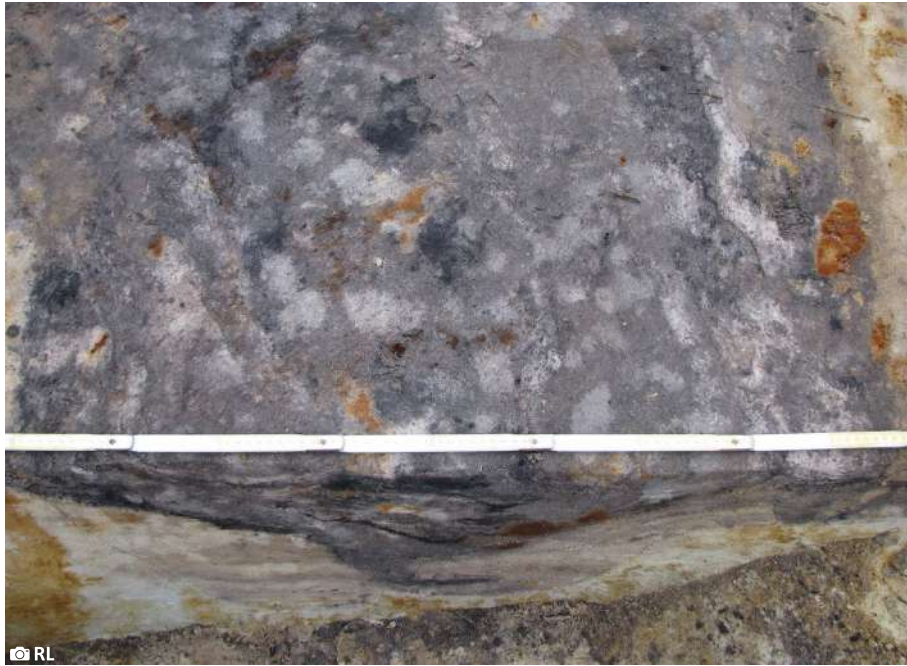
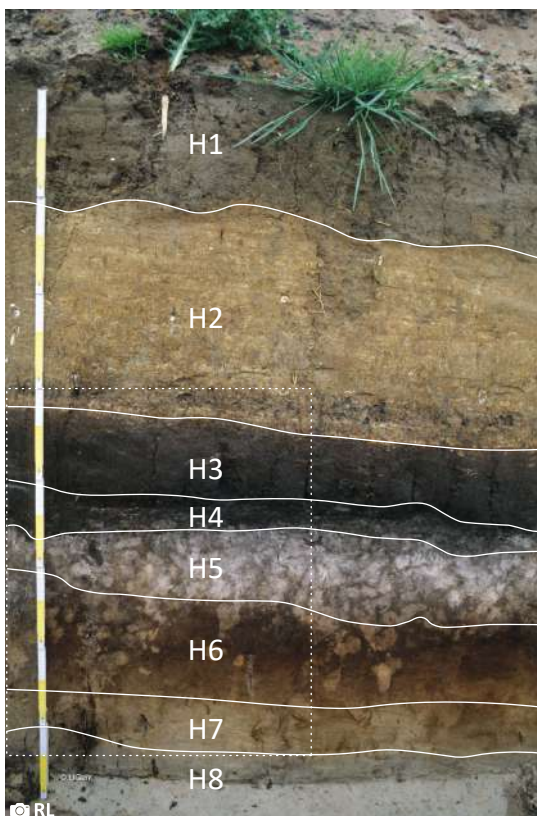
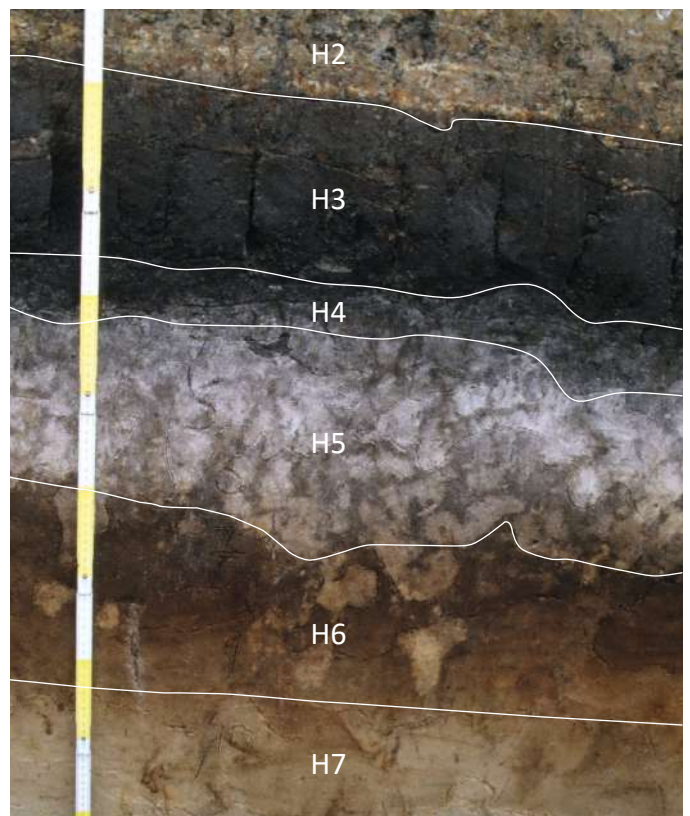


Fig. K81: Site van Hertsberge-Papevijvers. Grachtvulling rijk aan humusstoffen die sterk zijn aangetast door microbiologische activiteit (lichtgrijze kleur). De zwarte ronde vlekken zijn molgalerijen gevuld met aarde van de oppervlaktehorizont. Oostkamp, provincie West-Vlaanderen. België (Van de Vijver *et al.*, 2009).



H1: Ap.
H2: BC; licht gestratificeerde klei.
H3: 2H; begraven veen.
H4: 3A; humusaangerijkte oppervlaktehorizont.
H5: 3E; uitlogingshorizont.
H6: 3Bh; humusaanrijkingshorizont. De verteerde humusvlekken tonen geen accumulatie van ijzer, dit is dus een humuspodzol.
H7: 3BC(h); overgangshorizont naar het moeder-materiaal.
H8: 3Cr; zandig moeder-materiaal.



H1-2: kalkhoudende polderklei.
H3: veenontwikkeling op de grondwaterpodzol.
H4-7: begraven grondwaterpodzol sterk aangetast door microbiologische consumptie van humusstoffen.

Fig. K82-83: Site Verrebroek-dok. Links het profiel, rechts een detail. Verrebroek, provincie Oost-Vlaanderen, België (Louwagie & Langohr, 2005).

6. Gebruik van kleur in bodemclassificatie

Kleurnotering werd vroeger veel gebruikt in de naam van (oudere) bodemclassificatiesystemen.

Een voorbeeld is de bodemclassificatie van de Verenigde Staten van 1938 (Baldwin *et al.*, 1938). Elf van de 49 *Great Soil Group*-namen hadden een directe vermelding van de kleur (in het Engels); enkele voorbeelden zijn *Brown soils*, *Chestnut soils*, *Gray-Brown Podzolic soils*, *Red-Yellow Podzolic soils*, *Reddish-Brown Lateritic soils*.

In de laatste 60 jaar is men in de meeste bodemclassificatiesystemen afgestapt van deze directe vermelding van kleur in de naam van de bodem. Nochtans blijven de nog steeds gebruikte namen zoals 'Andosol' (an = Japans voor zwart), 'Podzol' (zola = Russisch voor houtas, die een typisch lichtgrijze kleur bezit) en 'Chernozem' (chern = Russisch voor zwart) verwijzen naar een kleur.

REFERENTIES

- Anonymous, 1954. *Munsell Soil Color Charts*. Munsell Color Company, INC, Baltimore, Maryland, USA.
- Baldwin, M., Kellogg, E. & Thorp, J., 1938. Soil classification. In: *Soils and men*. U.S. Dep. Agr. Yearb. Agr., U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 979-1001.
- FAO, 2006. *Guidelines for soil description*. 4th ed., Rome, Italy, pp 97.
- Gebhardt, A. & Langohr, R. 1996. Archaeo-pedological study of post-occupational processes from a Medieval motte in Werken (West Flanders, Belgium). In: *L'homme et la nature au Moyen Age*. Actes du Ve. Congrès international d'archéologie médiévale (Grenoble, octobre 1993), 214-216.
- Gebhardt, A. & Langohr, R. 1999. Micromorphological studies of construction materials and living floors in the medieval motte of Werken (West Flanders, Belgium). *Geoarchaeology*, 14, 595-620.
- Langohr R. 1991. Soil characteristics of the Motte of Werken (West Flanders, Belgium). In: *Methoden und Perspektiven der Archäologie des Mittelalters, Tagungsberichte zum interdisziplinären Kolloquium*. Sept. 1989 in Liestal (Schweiz) (Ed. Tauber, J.). Archäologie und Museum, Heft 020, Berichte aus der Arbeit des Amtes für Museen und Archäologie des Kantons Baselland, 209-223.
- Langohr R. & Pieters M. 1990. The paleosoils of the middle Kapthurin Formation. In: *The Kapthurin Formation revisited* (Eds. Cornelissen, E. *et al.*). The African Archaeological Review, 8, 51-58.
- Louwagie, G. & Langohr, R. 2005. Pedo-lithostratigraphical analysis. In: *The Last Hunter-Gatherer-Fishermen in Sandy Flanders (NW-Belgium). The Verrebroek and Doel Excavation Projects. Volume 1: Palaeo-environment, chronology and features* (Ed. Crombé, Ph.), 27-107. Archaeological Reports Ghent University 3, 334 pp.
- Mees, F. & Langohr, R., 2020. Undisturbed iron industry sites in the Sonian Forest, Belgium. *Journal of Archaeological Science - Reports* 29, 1-5.
- Mikkelsen, J.H., Langohr, R. & Vanwesenbeeck, V. 2002. Bodemkundig onderzoek op de archeologische site Brecht Zoegweg - potstallen, provincie Antwerpen, België. In: *Archeologisch onderzoek van het HSL-traject Antwerpen - Nederlandse grens*. Provinciebestuur van Antwerpen, Archeo-Bodemkundige rapport nr. 4, 144 pp.
- Mikkelsen, J., Langohr, R., Vanwesenbeeck, V., Bourgeois, I. & De Clercq, W. 2019. The Byre's tale. Farming nutrient-poor cover sands at the edge of the Roman Empire (NW-Belgium). In: *Soils as records of past and present. From soil surveys to archaeological sites: research strategies for interpreting soil characteristics* (Eds. Deák, J., Ampe, C. & Mikkelsen, J.), 65-84. Proceedings of the Geoarchaeological Meeting, Bruges (Belgium), 6 & 7 November 2019. Raakvlak, Bruges, 319 pp.
- Mikkelsen, J., Ampe, C., Cools, N., Devos, Y., Dondeyne, S., Oorts, K., Pieters, M. & Langohr, R., 2022. Veldhandleiding voor het beschrijven van bodems bij archeologisch onderzoek in Vlaanderen. Handelingen agentschap Onroerend Erfgoed 29, 80 pp.
- Nielsen, K.E., Dalsgaard, K. & Nørnberg, P., 1987. Effects on Soils of an Oak Invasion of a Calluna Heath, Denmark, I. Morphology and Chemistry. *Geoderma*, 41, 79-95.
- Schulze, D., Nagel, J., Van Scoyoc, G., Henderson, T., Baumgardner, F. & Stott, D., 1993. Significance of organic matter in determining soil colors. In: *Soil Color* (Eds. Bidham, J. & Ciolkosz, E.), 71-90. SSSA Special Publication No. 31, 159 pp.
- Schwertmann, U., 1993. Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. In: *Soil Color* (Eds. Bidham, J. & Ciolkosz, E.), 51-69. SSSA Special Publication No. 31, 159 pp.
- Simonson, R., 1993. Soil Color Standards and Terms for Field Use – History of Their Development. In: *Soil Color* (Eds. Bidham, J. & Ciolkosz, E.), 1-20. SSSA Special Publication No. 31, 159 pp.
- Van de Vijver, M., Dalle, S., Sergeant J., De Mulder, G., Langohr R., Van Meirvenne M., Ameloot N., Simpson D., Saey T., Bourgeois J. & Crombé P., 2009. Evaluatie en waardering van de archeologische sites Rooiveld-Papevijvers, Oostkamp (West-Vlaanderen). UGent Archeologische Rapporten 17, 160 pp.

Geraadpleegde website op 10/09/2025

https://en.wikipedia.org/wiki/Munsell_color_system

IN DIALOOG MET BODEMS VELDBODEMKUNDE VOOR ARCHEOLOGISCH ONDERZOEK

BODEMSTRUCTUUR, DRUK EN COMPACTIE



AUTEURS : ROGER LANGOHR
CAROLE AMPE
JARI HINSCH MIKKELSEN

1. Inleiding

De bodem is opgebouwd uit minerale deeltjes, organisch materiaal, lucht en water. De minerale bodemdeeltjes kunnen naargelang hun afmetingen onderverdeeld worden in een grove (diameter groter dan 2 mm) en een fijne fractie (diameter kleiner dan 2 mm). De fijne fractie bestaat uit zand, leem en klei. De relatieve hoeveelheid van de fracties zand, leem en klei vormen de korrelgroottesamenstelling of textuur van de bodem.

De afzonderlijke minerale en organische bodemdeeltjes kunnen zich door fysische, chemische en biologische processen samenvoegen tot aggregaten of structuurelementen. De aggregaten vormen samen met de holtes (de poriën) de bodemstructuur.

2. Aggregaten of structuureenheden

Aggregaten of structuureenheden zijn natuurlijke eenheden van het bodemmateriaal. Ze worden gevormd door bodemgenetische processen en van elkaar gescheiden door breukvlakken (barstjes) (En.: *aggregates*, *peds*, *pedality*; Fr.: *aggrégats*).

Traditioneel worden er bij de observatie van aggregaten, drie aspecten beschreven:

- vorm,
- afmeting: wordt meestal beschreven met grootteklassen maar het is aangeraden om de aggregaten juist op te meten (cm, mm),
- graad van ontwikkeling: hoe beter de breukvlakken ontwikkeld zijn, hoe 'sterker' de structuur is.

3. Processen verantwoordelijk voor de vorming van bodemstructuur

Drie processen zijn hier belangrijk:

- biologische activiteit,
- droog/vochtig cycli,
- vries/dooi cycli. De structuren gevormd door vries/dooi processen komen uitgebreid aan bod in het thema 'Periglaciale processen en krypturbatie'.

4. Belangrijkste aggregaatvormen

De belangrijkste aggregaatvormen zijn:

- sferische of bolstructuur, met types korrel- of granulaire structuur en kruimelstructuur (En.: *granular*; Fr.: *granulaire*) (zie §6.2. Sferische structuur);
- platen (En.: *platy*; Fr.: *lamellaire*) met de types blad-, plaat- en lensvormig in functie van de dikte van de aggregaten (zie §6.3. Plaatstructuur);
- blokken (En.: *blocky*), met types scherp-blokkig en subhoekig/afgerond-blokkig (zie §6.4. Blokstructuur);
- prisma's (En.: *prismatic*) (zie §6.5. Prismastructuur);
- wigvormig en ruitvormig (En.: *wedge-shaped and lozenge structure*) – (zie §6.5.1. De vertisol prismastuur);
- vesiculair (blaasvormig) (porositeit) (zie §6.6. Vesiculair structuur);
- massief (En.: *massive*; Fr.: *massif*) of loskorrelig (En.: *single grained*): geen structuur. Dit wil niet zeggen dat de bodem compact is! (zie §6.7. Bodems zonder structuur).

Soms wordt ook de term conchoïd (cfr. schelpvormig) gebruikt om aan te duiden dat de vlakken van een blok of een prisma licht gebogen zijn.

Bodemfragmenten die ontstaan door directe menselijke activiteit zoals het spitten en ploegen, noemt men 'kluiten' of 'fragmenten' (En.: *clods*, *fragments*).

5. Structuratie en destructuratie

Hierboven werden de belangrijkste types van bodemstructuur en de vormingsprocessen ervan aangehaald. Dezelfde processen kunnen de bodemstructuur ook terug afbreken, wat men destructuratie noemt. De cycli van droog/vochtig zijn verantwoordelijk voor de vorming van aggregaten, maar ze kunnen eveneens aggregaten opnieuw doen samensmelten. Bij de overgang van droog naar vochtig kan de klei in de aggregaten zwellen, waardoor de aggregaten terug samensmelten (e.g. Galavi & Schweiger, 2009). Het gevolg is de aanwezigheid van **'onvolledige'** aggregaten. Door aandachtig de bodem te observeren kan men de **'graad van volledigheid'** bepalen. Deze eigenschap speelt een belangrijke rol voor de wortelpenetratie en de waterpercolatie in de bodem omdat het bepalend is in hoeverre het poriën- en barstensysteem continu/discontinu is.

6. Structuur, morfologie en verband met het milieu

6.1. Primaire en secundaire structuur, structuurgradiënten, methode van structuurobservatie

Grote structuureenheden kunnen soms opgebouwd zijn uit vele kleinere eenheden. Zo kunnen grote prisma-eenheden opbreken in kleinere blokken die zelf bestaan uit nog kleinere blokken. We spreken dan van een primaire en een secundaire structuur (figuur S1).

Dikwijls volgen de structuurvormen elkaar op doorheen het profiel in functie van de gradiënt van bodemgenetische processen (figuren S2-S4).

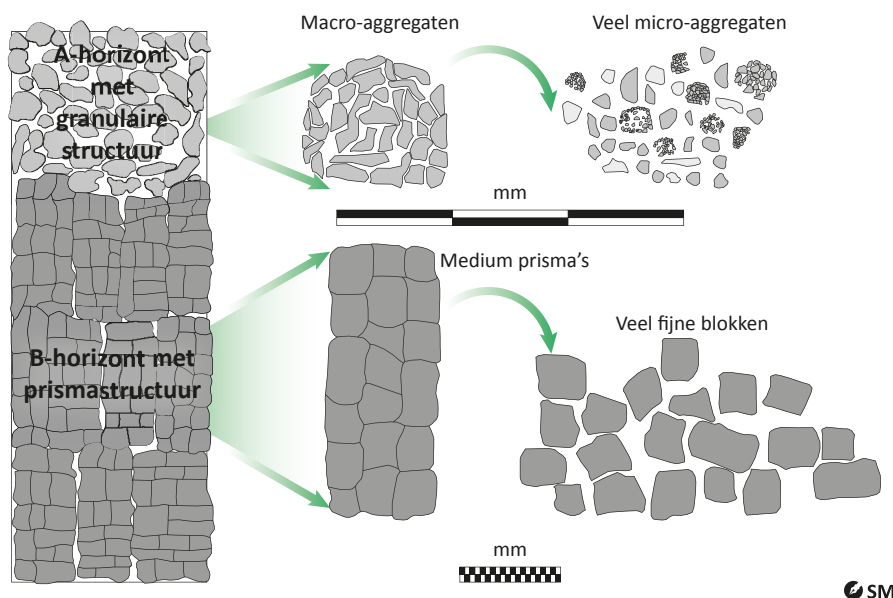
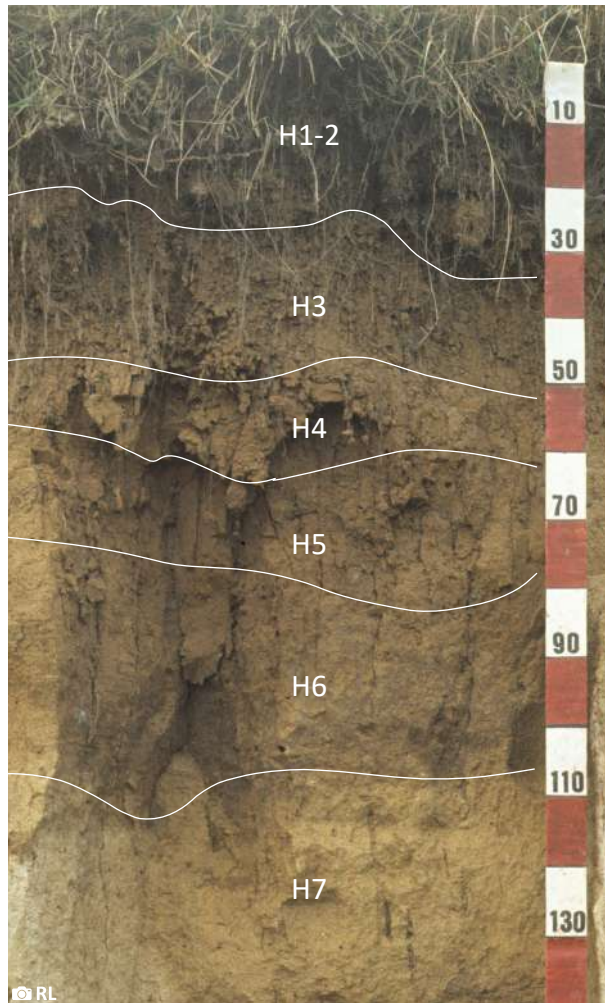


Fig. S1: Primaire en secundaire structuur. De grotere structuureenheden of primaire eenheden van het bodemprofiel zijn opgebouwd uit kleinere aggregaten of de secundaire eenheden. (bron: Brady, 2008).



H1: kruimelstructuur door biologische activiteit (wormen, mieren, ...) in associatie met een dicht fijn wortelstelsel van grasvegetatie.

H2: overgang van H1 naar H3.

H3: subhoekige blokstructuur: vochtig/droog en zwel/krimp cycli, in associatie met biologische activiteit

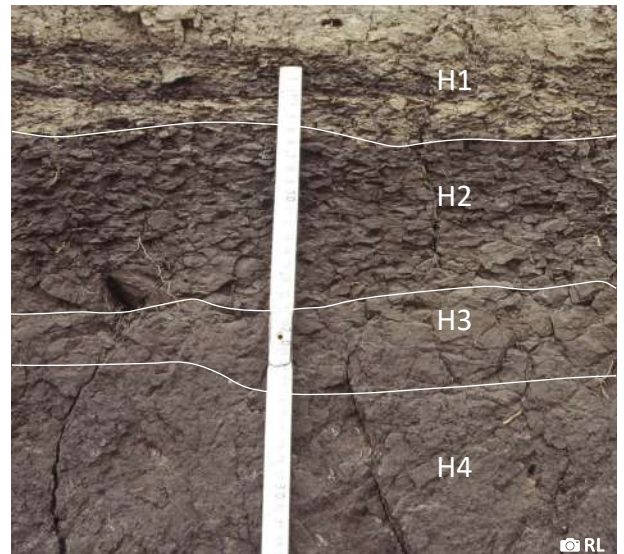
H4: hoekige blokstructuur door vochtig/droog en zwel/krimp cycli.

H5: fijne prismastructuur met secundaire hoekige blokstructuur als gevolg van vochtig/droog en zwel/krimp cycli.

H6: grove prismastructuur met secundaire middelmatige grote prismastructuur als gevolg van vochtig/droog en zwel/krimp cycli.

H7: massief, zonder structuur, horizont ligt te diep voor droog/vochtig cycli. Kalkrijk moedermateriaal van de bodem (löss).

Fig. S2: Structuur in een leembodem met voorbeelden van primaire en secundaire structuureenheden. Harmignies, provincie Henegouwen, België.



H1: bladstructuur door ijssegregatie.

H2: lensvormige structuur door ijssegregatie.

H3: conchoïde hoekige blokstructuur door uitdroging gevolgd door ijssegregatie.

H4: conchoïde prismastructuur door plotse sterke uitdroging. In lange vorstperioden kan er ook ijssegregatie optreden tussen de structuurvlakken.

Fig. S3: Mooi voorbeeld van een structuursequentie als gevolg van één enkele vorstperiode in een compacte leembodem. In een kleiige bodem zouden H1 en H2 een fijne korrelstructuur vertonen (detail zie fig. S32). Debrecen, Hongarije.

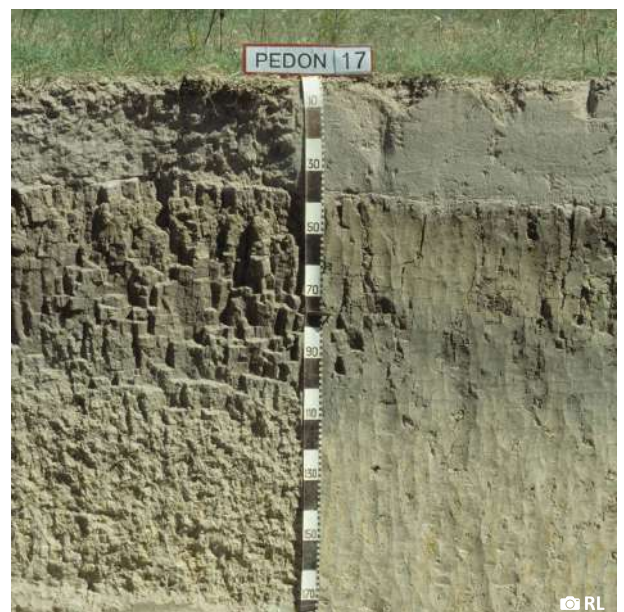


Fig. S4: Methode van structuurobservatie. Links het bodemprofiel met structuur. Rechts de vlak gestreken profielwand waarop het mogelijk is om twee, iets donkerdere horizonten te observeren tussen 35 en 45 cm en tussen 75 en 95 cm. Louisiana, USA.

6.2. Sferische structuur

Definitie: de aggregaten hebben meestal een sferische of bolvorm met onregelmatige oppervlakken die niet in elkaar passen.

Types: korrel of granulaire structuur: de aggregaten zijn weinig of niet poreus; kruimelstructuur: aggregaten zijn poreus.

De sferische structuur is vooral het gevolg van biologische activiteit (wormen, mieren, mollen, mestkevers, ...), maar kan ook het gevolg zijn van vries/dooi cycli. Deze structuur is zeer gunstig voor (bodem) verluchting, beworteling en waterpercolatie.

Deze structuur komt vooral voor:

- in bodems met een mull humustype, dit wil zeggen dat de strooisellaag sterk verteerd is en het organisch materiaal vermengd is met de minerale bodemdeeltjes. Dit humustype heeft typisch een C/N verhouding tussen 10 en 15. De C/N (koolstof/stikstof) verhouding zegt iets over de kwaliteit van de organische stof; organische stof met een lage C/N verhouding bevat relatief meer N en zal gemakkelijker afbreken dan organische stof met een hoge C/N verhouding;
- in begraasde weiden en graslanden. Deze bodems kunnen relatief zuur zijn, maar hebben een lage

C/N verhouding waardoor een belangrijke wormen molpopulatie in deze bodem leeft. (figuren S5-S18);

- op kalkrijke bodems (krijt, kalksteen), ook onder bos. In deze bodems is er eveneens een intensieve activiteit van gravende dieren door een lage C/N verhouding;
- onder een grasvegetatie. Dit vegetatietype is bevorderlijk voor de sferische structuur, met name van het kruimelige type, vooral als het wortelsysteem dicht vertakt is (figuren S20-S21).

Een sferische structuur, meestal van het granulaire type, kan ook ontstaan door vries/dooi cycli met vorming van naaldijs in een oppervlaktehorizont (figuur S19).

Een bijzondere genese van een sferische structuur, komt voor in bodems met zwellende kleien vanaf het oppervlak en in een klimaat met een afwisseling van een droog en vochtig seizoen (§6.5.1. De vertisol prismastructuur) (figuren S22-S24). Door de uitdroging en de sterke krimp van de oppervlaktehorizont vormt er zich een horizont met sferische structuur die zowel granulair als kruimelig kan zijn. Dit is bevorderlijk voor de landbouw aangezien dit een uitstekend zaadbed vormt in een bodem die anders zeer moeilijk te bewerken is. Dit proces noemt men '*selfmulching*' (§6.5.1. De vertisol primastructuur).

Figuren S5-S24 vertonen een 'volledig ontwikkelde sferische structuur'



Fig. S5-S6: Sferische structuur van het kruimeltype te wijten aan de graafactiviteit van een mol. Füllinsdorf, Zwitserland.



Fig. S7-S8: Sferische structuur van het korrel/granulair type te wijten aan de graafactiviteit van een mestkever. Zoniën-woud, België.



Fig. S9-S10: Sferische structuur van het kruimeltype te wijten aan de graafactiviteit van mieren. Sint-Pieters-Woluwe, België.



Fig. S11-S13: Sferische structuur te wijten aan de graafactiviteit van mieren, fig. S11, S12 kruimeltype. Zoniënwood, België. fig. S13 korrel/granulair type. Terralba, Italië.



Fig. S14-S16: Sferische structuur van het korrel/granulair type te wijten aan de graafactiviteit van een grote regenworm (*Lumbricus terrestris*). Fig. S14: Vresse-sur-Semois, provincie Namen, België. Schaal fig. S15: 5 mm. Fig. S16: Villenoy, departement Seine-et-Marne, France.

Fig. S17-S18: Sferische structuur van het korrel/granulair type in zand te wijten aan graafende bijen. Verrewinkelbos, Ukkel, België.





Fig. S19: Groei van naaldijs heeft het bodemoppervlak, inclusief de jonge planten, sterk verstoord met de ontwikkeling van een sferische structuur van het korrel/granulair type in een tuinbodem. Sint-Pieters-Woluwe, België.



Fig. S20-S21: Een dicht vertakt wortelsysteem onder een grasvegetatie bevordert het behoud van de sferische structuur van het kruimeltype. Göttingen, deelstaat Nedersaksen, Duitsland.



Fig. S22-S24: Bodem rijk aan zwellende klei tot aan het oppervlak. Ontwikkeling van een 6 cm dikke oppervlaktehorizont met een sferische structuur van het korrel/granulair type tijdens de droge periode ('self-mulching'). Een deel van deze korrels kan in de open barsten vallen. Fig. S22: Túrkeve, Hongarije. S23: Baringo, Kenia. S24: Java, Indonesië.

6.3. Plaatstructuur

Definitie: de aggregaten liggen meestal evenwijdig aan het bodemoppervlak. De dikte varieert van enkele millimeters tot meerdere centimeters, de verticale as is veel kleiner dan de horizontale assen.

Types: blad-, plaat- en lensvormig.

Plaatstructuur (En.: *platy*) wordt vooral gevormd door ijssegregatie bij vries/dooi cycli. Ze ontwikkelt zich het best in compacte (weinig poriën), vochtige bodemhorizonten (zie thema 'Periglaciale processen en kryoturbatie'). Ook in ploegzolen en oppervlaktehorizonten, verdicht door betreding van machines, vee ('*traffic pan*')... zowel in bos, in groeven als op akkerland, komt plaatstructuur voor. Een ploegzool is een verdichte horizont aan de onderzijde van of onder de ploeglaag veroorzaakt door de bodem steeds op dezelfde diepte te bewerken. Plaatstructuur is niet bevorderlijk voor wortelpenetratie noch voor waterpercolatie.

Compacte geologische sedimenten zoals een grondmorene vertonen dikwijls plaatstructuren als gevolg van vries/dooi cycli.

Plaatstructuur komt ook voor in paleobodems die sterke vries/dooi processen hebben ondergaan tijdens de ijstijd, zoals bijvoorbeeld de 'Rocourt' bo-

dem die dateert uit de voorlaatste interglaciale periode, het Eem.

Bij een goed ontwikkelde structuur door het vries/dooi proces kan de plaatstructuur (figuur S3) naar gelang de diepte in de bodem opgesplitst worden in:

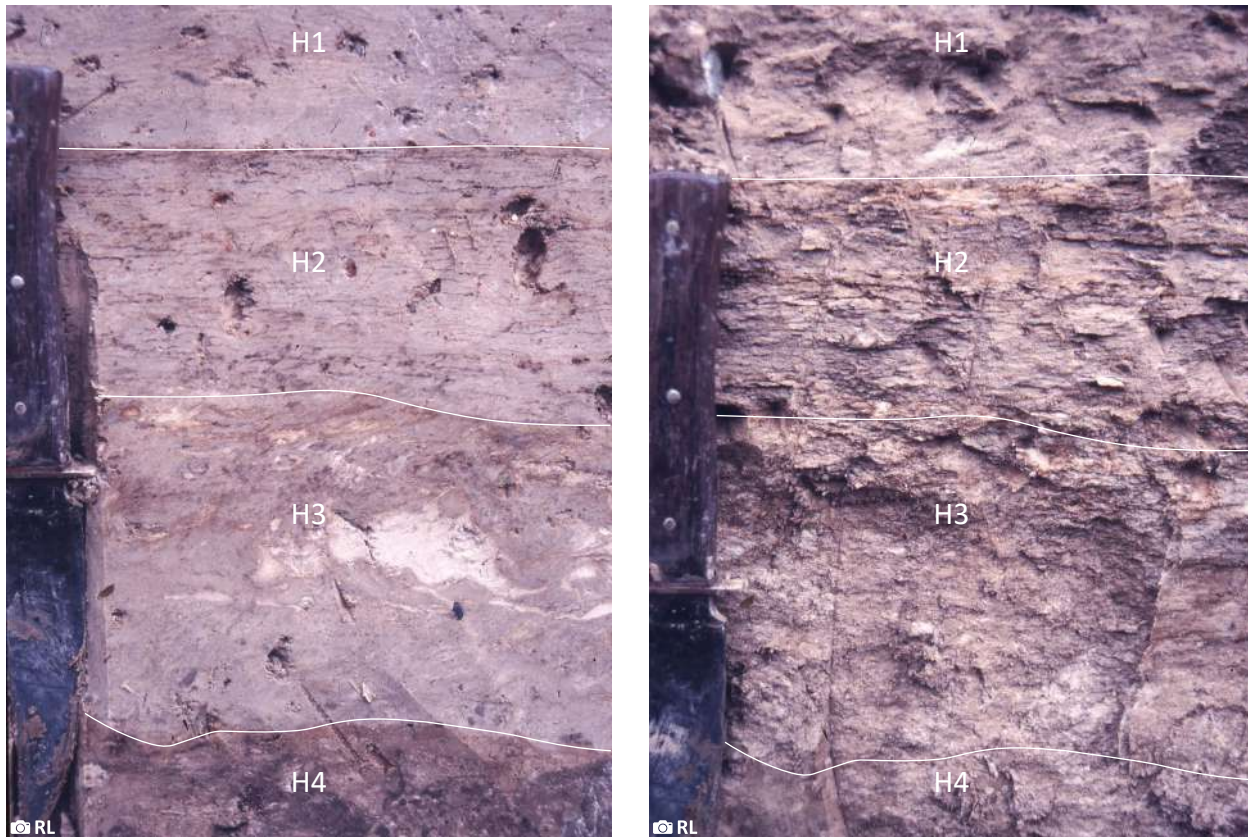
- **bladstructuur**, amper een paar millimeter dik (figuren S25-S28);
- **plaatstructuur**, dikker dan voorgaande (figuur S29);
- **lensvormige** structuur (figuren S30-S33). Structuureenheden hebben gebogen oppervlakken die elkaar overlappen.

De plaatvormige structuureenheden vormen zich door een barstensysteem dat ontstaat bij ijssegregatie. De druk van het ijs verdicht de aggregaten sterk. Door verschillen in de dikte van de ijssegregatie is het poriënsysteem onderbroken waardoor wortels en water slechts met moeite in de bodem dringen. Met het geleidelijk uitdrogen van de ondergrond worden de structuureenheden geleidelijk dikker, gaande van een blad- over een plaat- naar een lensvormige structuur.

Onder de bevroren bodem, kan er zich een conchoïde prismastructuur vormen ten gevolge van de zeer sterke uitdroging (zie verder §6.5.6. Vries/dooi prismastructuur).



Fig. S25-S26: Ijssegregatie met vorming van een bladstructuur in een leembodem. Zoniënwoud, België.



H1: grond die een voormalig pad begraaft.

H2: begraven oppervlaktehorizont van een oud pad. De bodem van het pad is sterk samengedrukt. Door vroegere ijssegregatie ontwikkelde er zich een bladstructuur. Sporen van roest op de bladstructuur.

H3: niet verdichte horizont met vloeistrukturen als gevolg van de druk uitgeoefend door het pad.

H4: horizont met talrijke humusrijke fragmenten. Op deze diepte is de bodem niet meer samengedrukt door het pad (H2).

Fig. S27-S28: Bladstructuur gevormd door ijssegregatie in een leembodem verdicht door intense betreding (oud pad). Fig. S27: Gladgestreken profiel. Fig. S28: Zelfde profiel, geborsteld om de structuur beter zichtbaar te maken. Lössbodem, Velzeke, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. S29: Blad- en plaatstructuur als gevolg van vries/dooi cycli in een compacte grondmorene. North Island, Nieuw-Zeeland.



Fig. S30-S31: Lensstructuur in een begraven, compact wegdek. Ter hoogte van de vroegere ijssegregatie, komt er een concentratie voor van gebleekt wit zand veroorzaakt door de watercirculatie tijdens de dooi van de ijssegregatie. Sint-Pietersplein, Gent, provincie Oost-Vlaanderen, België.

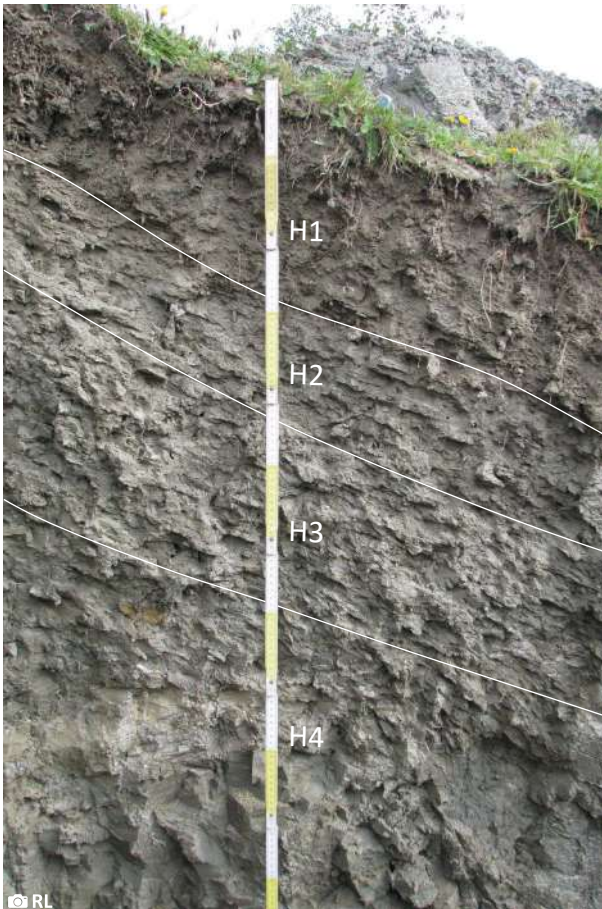


Fig. S32: Een goed ontwikkelde plaatstructuur (H2) door vorst en ijssegregatie in een kleirijke bodem. H3 heeft een onvolledige plaatstructuur die in een onvolledige hoekige blockstructuur uiteenvalt. H4 heeft een hoekige blockstructuur die groter wordt met de diepte. Zuidwest-Noorwegen.



Fig. S33: Detail van de lensstructuur (zie fig. S3) tussen 5 en 12 cm. Tijdens de vorstperiode worden deze structuureenheden gescheiden door ijssegregatiebladen die van enkele millimeters tot enkele centimeters dik kunnen zijn. Hierdoor kan de grond opgetild worden. Debrecen, Hongarije.

6.4. Blokstructuur

Definitie: de vorm van de agregaten lijkt op een kubus, bijna equidimensionaal, met oppervlakken die goed aansluiten met de omliggende blokeenheden.

Types: hoekig-blokkig met relatief scherpe hoeken (figuren S34-S37) en subhoekig-subblokkig met afgeronde hoeken (figuren S38-S40).

Blokstructuur (En.: *blocky*) is hoofdzakelijk het gevolg van krimp/zwel processen ten gevolge van vochtig/droog cycli. Deze structuur komt voor in bodems die een zekere hoeveelheid klei bevatten. Dit is het geval voor kleirijke bodems zoals recente polders, bodems ontwikkeld op mergel, op oude kleirijke mariene afzettingen (o.a. glauconietrijk) of lemige bodems met een Bt-horizont (klei-accumulatie horizont).

Deze structuur begint over het algemeen rond een diepte waar de biologische activiteit van wortels en gravende dieren vermindert. Ze loopt door tot een diepte waar de bodem altijd een vochtgehalte bezit

dat overeenkomt met veldcapaciteit of hoger. Dit is de bodemtoestand na lange perioden van regen en diep percolerend water. Met de diepte worden de aggregaten geleidelijk aan groter. Dit komt omdat de diepere bodemhorizonten minder sterk uitdrogen.

De **blokstructuur** wordt onderverdeeld in **hoekige** (figuren S34-S37) en **subhoekige** blokstructuur (figuren S38-S40).

De subhoekige blokstructuur komt voor in de overgangszone waar zowel biologische als zwel/krimp (droog/vochtig) processen plaats grijpen. De groei van naaldijs in een oppervlaktehorizont kan eveneens eenzelfde structuur voortbrengen.

De hoekige blokstructuur is hoofdzakelijk te wijten aan het zwel/krimp proces. Bij plotse uitdroging, zoals bijvoorbeeld in een vorstperiode, kan een conchoïde vorm ontstaan.

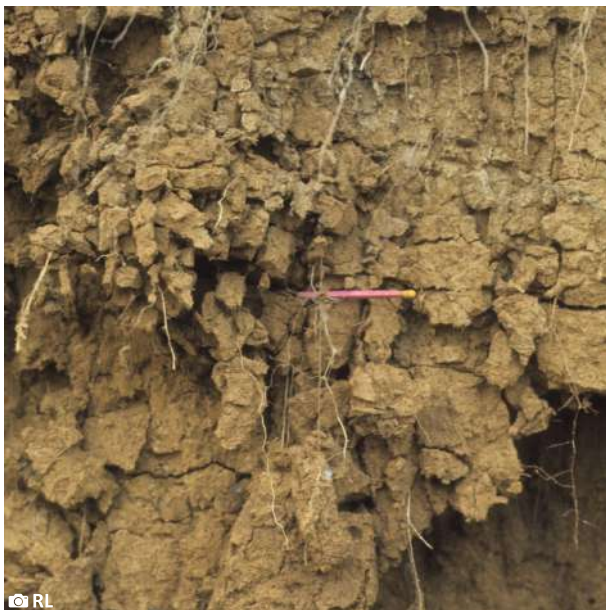


Fig. S34-S35: Hoekige blokstructuur in een leembodem. Harmignies, provincie Henegouwen, België.

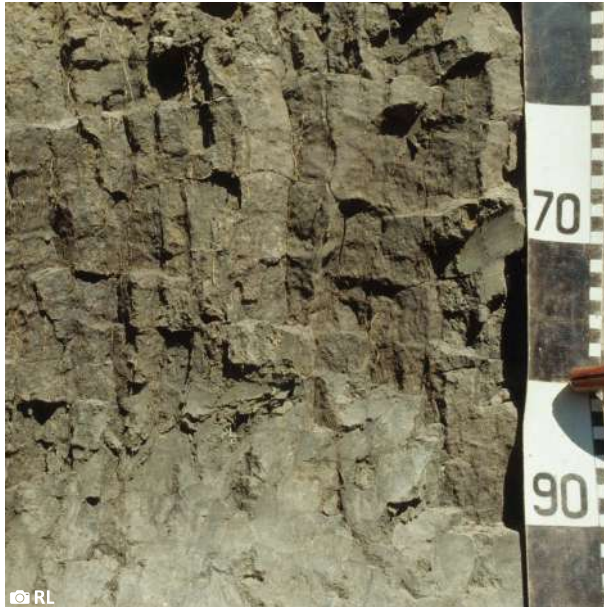


Fig. S36: Hoekige blokstructuur in een kleirijke bodem. Louisiana, USA.



Fig. S37: Hoekige conchoïde blokstructuur als gevolg van sterke, plotse uitdroging in een periode met vorst in een kleirijke bodem. Hachy, Belgisch-Lotharingen, België.



Fig. S38: Subhoekige blokstructuur in de bewerkingshorizont van een kleirijke bodem. Java, Indonesië.



Fig. S39-S40: Subhoekige blokstructuur door de ontwikkeling van naaldijs in de oppervlaktehorizont in een periode van vorst. Garfagnana, Italië.

6.5. Prismastructuur

Definitie: de aggregaten hebben een prisma-achtige vorm, ze zijn groter in de verticale dan in de horizontale dimensie.

De belangrijkste interne en externe milieucondities zijn hier:

- bodemtextuur,
- klimaat,
- kleitype,
- oververzadiging van water.

De prismastructuur gaat tot een diepte waar de bodem altijd een vochtgehalte bezit dat overeenkomt met veldcapaciteit of hoger, dit is de bodemtoestand na lange perioden van regen en diep percolerend water.

Zes typen prismastructuur kunnen onderscheiden worden:

- het vertisol type,
- het 'drukvlak' type,
- het normale type,
- het rijpingstype,
- het fragipan type,
- het vries/dooi type.

De vertisol prismastructuur

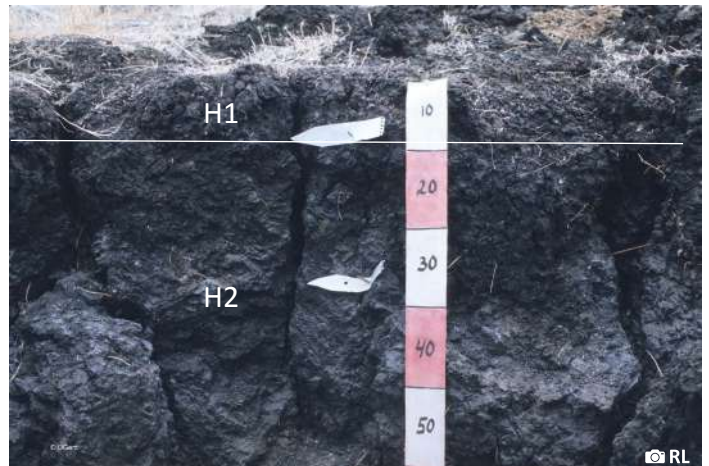
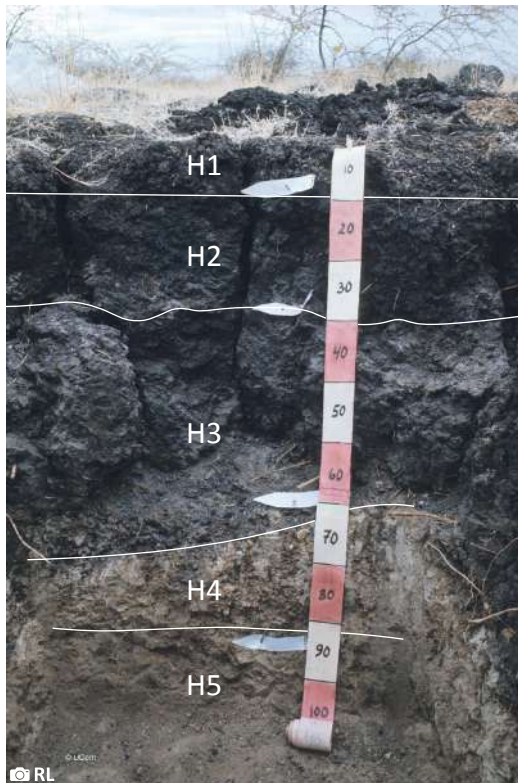
Vertisols zijn bodems die vanaf het oppervlak een hoge hoeveelheid aan zwellende kleien bevatten, zoals bijvoorbeeld smectieten met onder andere het kleimineraal montmorilloniet. Smectieten hebben de eigenschap dat ze tot 20 keer hun eigen gewicht aan water kunnen vasthouden. Wanneer dergelijke kleiige bodems voorkomen in een klimaat met uitgesproken vochtige en droge perioden, zal de klei tijdens het droge seizoen krimpen zodat vanaf het bodemoppervlak een prismatisch barstensysteem gevormd wordt. Aan het oppervlak kunnen de barsten meerdere centimeters breed zijn, zelfs barsten tot meer dan een decimeter breed zijn niet uitgesloten (figuren S41-S44). De wanden van de prisma's zijn ruw. De ligging van de prisma's is niet noodzakelijk jaar na jaar hetzelfde: de prisma's ontwikkelen zich naargelang de intensiteit van het uitdrogen van de bodem en de snelheid van de overgang van het vochtige naar het droge seizoen. Dit verklaart waarom lithische fragmenten (artefacten), die langs de barsten naar beneden glijden, zich later doorheen heel de bodemmatrix bevinden (figuren

S51-S53). Dit bodemgenetisch proces noemt men '*argilloturbatie*'.

In het vochtige seizoen groeien de wortels doorheen de bodemmatrix. In het droge seizoen groeien de wortels niet, waardoor er geen wortelgroei op de wanden van de prisma's voorkomt. De kans bestaat wel dat de wortels breken ter hoogte van de barsten in het droge seizoen (figuur S45).

Door de sterke uitdroging van de oppervlaktehorizont kan er een laag van zo'n 5 tot 10 cm dik ontstaan, die een fijne sferische structuur heeft. Vertisols die zo'n '*mulchlaag*' ontwikkelen zijn als het ware '*self-mulching*'. De granulaire of kruimelige aggregaten van de mulchlaag kunnen in de barsten naar beneden vallen en de barsten tussen de prisma's opvullen, zodat er nu meer bodemmateriaal dan eerst in de bodem aanwezig is. Tijdens het regenseizoen beginnen de kleien te zwellen, maar vermits de barsten al dan niet gedeeltelijk zijn opgevuld met mulch is er te weinig ruimte voor het sluiten van de barsten. Hierdoor komt de bodem onder een zeer sterke interne druk te staan ter hoogte van de ondergrens van de prismatische barsten (figuren S48-S50). Om te ontsnappen aan deze interne druk, gaat de bodem 'bewegen' met als gevolg de ontwikkeling van min of meer schuine glijvlakken, ook '*slickensides*' genoemd. De kruisende glijvlakken vormen wigvormige blokken. Het bodemoppervlak zelf wordt omhoog geduwd zodat er een golvend oppervlak ontstaat (figuren S46-S47). Dit noemt men het '*gilgai*' microreliëf (figuur S56) (Australische talen/Aboriginaltalen: kleine waterpoel). Op een vlak terrein bestaat dit microreliëf uit min of meer ronde gesloten depressies omringd door bultjes, op hellingen zijn het afwisselend ruggen en depressies die hellingafwaarts lopen (figuur S57).

Dit zwel/krimp proces is verantwoordelijk voor belangrijke schade aan antropogene structuren zoals woningen, ondergrondse citernen, pijplijnen, wegen (figuren S58-S60). In België komen zware kleiige bodems voor, bijvoorbeeld in alluviale of estuariene afzettingen. Door het gebrek aan contrasterende droge en natte seizoenen kunnen *slickensides* en een *gilgai* microreliëf zich hier voorlopig niet ontwikkelen. Vandaar de afwezigheid van vertisolen in België.



H1: 0-8 cm: sferische structuur door self-mulching.

H2: 8-28 cm: zone met het best ontwikkelde barstensysteem.

H3: 28-60 cm: zone met *slickensides*.

Fig. S41-S42: Een profiel van een vertisol in het droge seizoen (Fig. S41) en detail (Fig. S42). Parral, Chili.



Fig. S43: Barsten kunnen meer dan een decimeter breed zijn. Parral, Chili.



Fig. S44: Vertisol in het droge seizoen. De horizont met *slickensides* start vanaf de onderste grens van de barsten. Java, Indonesië.



Fig. S45: In een vertisol groeien de wortels doorheen de matrix in het vochtige seizoen. Er is geen wortelgroei in het droge seizoen. Louisiana, USA.



Fig. S46: Een vertisol tijdens de overgang van het droge naar het vochtige seizoen. Rechts: de depressie van de *gilgai* waar het water in het begin van het regenseizoen diep in de barsten dringt. Deze barsten werden tijdens het droog seizoen gedeeltelijk met oppervlakesedimenten gevuld. Door de sterke interne druk ontwikkelen zich glijvlakken (*slickensides*) die de bodem omhoogtillen ter hoogte van de meetlat. Het kalkrijk substraat komt zo hoger in het profiel. Louisiana, USA.



Fig. S47 (detail van fig. S46): Waar de *slickensides* elkaar kruisen komt er een wigvormige structuur voor. De kalkrijke verticale galerijen zijn lateraal verplaatst ter hoogte van de *slickensides*. Louisiana, USA.



Fig. S48-S50: Bij een vertisol in het regenseizoen zijn de barsten gesloten. Fig. S48: Het bodemprofiel. Fig. S49 (detail van S48): vanaf 110 cm diepte zijn de verticale biogalerijen gevuld met kalk. Fig. S50: De *slickensides* doorsnijden deze kalkconcentraties zodat ze lateraal verplaatst zijn. Waar de *slickensides* elkaar kruisen, komt er plaatselijk een wigvormige structuur voor. Hongarije.



Fig. S51: Niet alleen fijne bodemfragmenten, maar ook lithische voorwerpen (artefacten...) kunnen in de open barsten naar beneden glijden. De ligging van de prisma's verschilt van jaar tot jaar, naargelang de intensiteit van het uitdrogen van de bodem en van de snelheid van de overgang van het vochtige naar het droge seizoen. Hierdoor liggen de lithische fragmenten verspreid in de bodemmatrix. Louisiana, USA.



Fig. S52: Een vertisol ontwikkeld in kleirijk alluvium. De lithische fragmenten liggen verspreid doorheen de matrix. Noord-Tunesië.



Fig. S53: Een artefact daterend van laat-Acheuleaan tot post-Acheuleaan in een paleobodem met kenmerken van een vertisol. Middle Kapthurin Formation, Kenia. (Langohr & Pieters, 1990).

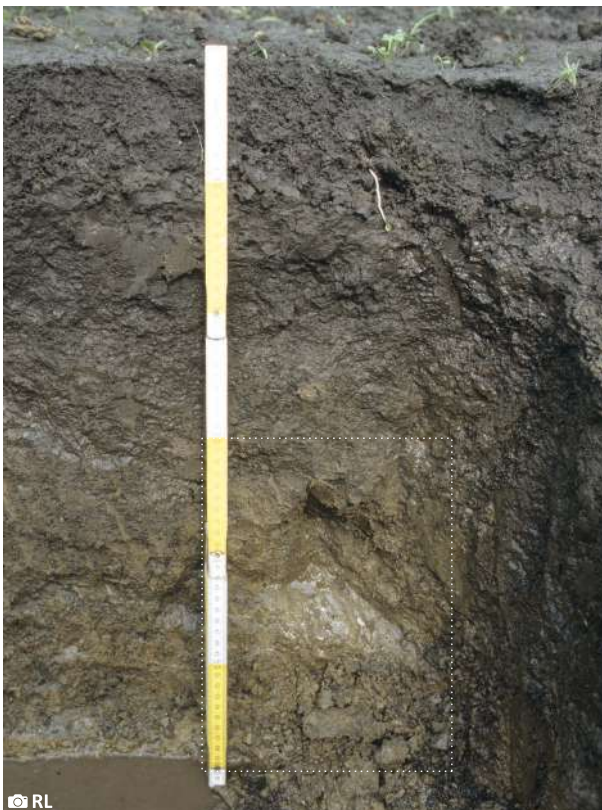


Fig. S54-S55: Tijdens het regenseizoen is de vertisol grotendeels ondoorlatend (zie fig. S56), enkel langsheen de *slickensides* beweegt nog een beetje water. Slowakije.





Fig. S56: In het regenseizoen bestaat, op een vlak terrein, het *gilgai* microreliëf uit een netwerk van smalle ruggetjes en ronde microdepressies. © <https://alchetron.com/Gilgai>



Fig. S57: Op een helling bestaat het *gilgai* microreliëf uit een opeenvolging van parallelle rugen en depressies die helling-afwaarts lopen. © <https://www.uidaho.edu/cals/soil-orders/vertisols>



Fig. S58: Alle elektriciteitspalen staan schuin door de aanwezigheid van zwellende klei in de bodem. Centraal Zuid-Canada.



Fig. S59-S60: Constructies gebouwd op een bodem rijk aan zwellende kleien moeten voorzien worden van speciale funderingen, zoniet kunnen ze grote schade ondervinden. Dit is een belangrijke post bij verzekeringsmaatschappijen voor schadevergoedingen. S59: © <https://buildfree.org/foundation-repairs.html>, S60: © <https://getinthering.co/land-subsidence>.

De 'drukvlak' prismastructuur

De drukvlak prismastructuur (En.: *pressure face structure*) treft men aan in bodems met zwellende klei. Ze bevatten beduidend minder zwellende klei dan de vertisolen. Er ontwikkelt zich een prismastructuur met fijne barstjes. Kleine wortels kunnen binnendringen langs deze barstjes, maar tijdens het regenseizoen gaat de bodem zwellen, met als gevolg dat deze jonge wortels grotendeels afsterven door een gebrek aan zuurstof. De wortels die overleven, groeien doorheen de bodemmatrix (figuren S61-S64).

De wanden van de prismastructuur zijn zeer glad wat soms lijkt op de aanwezigheid van kleihuidjes.

De waterinfiltratie gebeurt grotendeels doorheen de matrix. De infiltratie langs de structuurvlakken is beperkt tot de periode van de overgang van het droge naar het vochtige seizoen.

Artefacten kunnen door bioturbatie zakken tot op het contact van de kleirijke horizont.

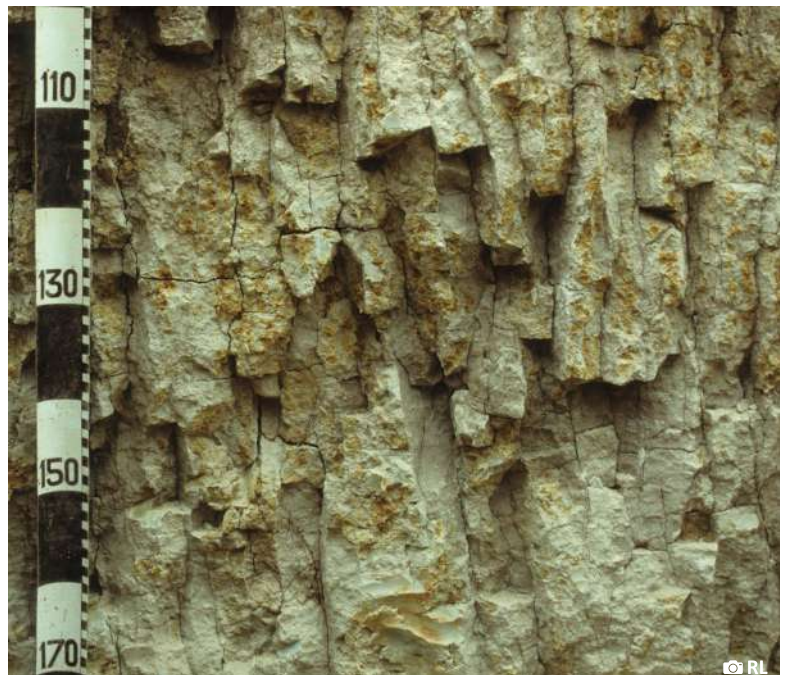


Fig. S61-S62: Drukvlak prismastructuur. De structuurvlakken zijn glad, de roestvlekken maken deel uit van de matrix. Dit zijn gebroken prisma's. Louisiana, USA.



Fig. S63-S64: Drukvlak prismastructuur. Slechts kleine, jonge wortels groeien langs de structuurvlakken. De grotere wortels die enkele jaren oud zijn, groeien doorheen de matrix. Louisiana, USA.

De ‘normale’ prismastructuur

De ‘normale’ prismastructuur is het meest voorkomende type van prismastructuur. Bodems met deze structuur hebben meestal een kleigehalte van minder dan 45 %. De klei is van het type dat weinig of niet zwellend is (zoals bijvoorbeeld illiet, vermiculiet). De meeste lössbodems die zich in een uitloingsklimaat (diepe ontkalking) bevinden, vertonen eveneens deze structuur.

In het droge seizoen krimpt de bodem een klein beetje waardoor er zich een prismastructuur ontwikkelt. Minerale (klei) en organische colloïden die in dispersietoestand zijn, kunnen migreren en zich afzetten op de prismawanden en minerale en organo-minerale huidjes vormen. De druk uitgeoefend door de prisma's tijdens het vochtige seizoen is niet voldoende om de prismabarstjes volledig te sluiten, waardoor wortels en water vrij in de bodem dringen langs deze structuureenheden. Wortels en water dringen ook doorheen de prisma's (figuren S65-S70).



Fig. S65: Prismastructuur in een lössontsluiting. De grens van ontkalking (overgang van donkere naar lichtere kleur) bevindt zich op een 110 cm diepte. Er is ongeveer 1,2 m bodem verdwenen door erosie ('oud' landbouwland). De prismastructuur gaat tot ongeveer tot 140 cm diepte, wat overeenkomt met de huidige diepte tot waar de bodem in de zomer uitdroogt. Harmignies, provincie Henegouwen, België. Fig. S2 toont de detail van de structuurgradiënten van hetzelfde bodemprofiel.



Fig. S66-S68: Profiel van een lössbodem onder oud landbouwland dat een 40-tal cm is geërodeerd. De prismastructuur gaat tot 120 cm diepte (fig. S67). De prismawanden vertonen grijsbruine *coatings* van klei-humuscolloïden (Fig. S68). Darion, provincie Luik, België.



Fig. S70: Een polderbodem met ongeveer 45 % weinig zwellende klei. Dit is nog net een normale prismastuctuur zonder drukvlakken. Dudzele, provincie West-Vlaanderen, België.

◀ Fig. S69: Glauconietrijke (groene kleur) tertiaire kleihorizont begraven onder een 60 cm dik lössdek. Door bodemreptatie hellingafwaarts, zijn de prisma's licht gebogen. Kooigem, provincie West-Vlaanderen, België.

Het rijpingsproces en de vorming van een prismastuctuur

In alluviale, delta, mangrove en mariene (schorre, slikke) afzettingen zijn de individuele bodemdeeltjes grotendeels omgeven door water. De bodem is een slappe waterverzadigde massa. Deze afzettingen zijn weinig stabiel en kunnen zelfs gevaarlijk zijn voor betreding (modder, drijfzand...) (figuren S71-S72).

De overgang van slib naar een meer stevige bodem, noemt men het 'rijpingsproces'. Dit proces is onomkeerbaar. Bij drainering droogt de bodem uit. Dit brengt de bodemdeeltjes voldoende dicht bij elkaar, zodat er een aantrekkingskracht ontstaat. Hierdoor vermindert de porositeit, is er minder plaats voor water en vermindert het bodemvolume. Ook enige gronden ondergaan na drainering een afname van het bodemvolume.

Bij het uitdrogen van de bodem aan het oppervlak zal een polygonaal barstenpatroon ontstaan. Deze barsten kunnen meer dan 10 cm breed en wigvormig zijn en tot meer dan een meter diep in de bodem dringen. Er wordt een prismastuctuur gevormd. Deze barsten blijven open, zelfs wanneer de bodem opnieuw onder water komt te staan. Het krimpproces is met andere woorden onomkeerbaar (figuren S73-S75). Mettertijd kunnen deze barsten

opgevuld geraken met bodemfragmenten afkomstig van de oppervlaktehorizont en van de inkalvende wanden (figuren S76-S86).

Ondergronds kunnen deze opgevolde barsten echter nog gedurende eeuwen werken als een draineringssysteem. Ook wortels zullen nog gedurende lange tijd preferentieel langsheen dit barstensysteem de bodem koloniseren.

Het rijpingsproces is in detail bestudeerd in Nederland: een groot deel van Nederland is immers gewonnen op alluviale, delta en mariene sedimenten.

Aan de hand van een veldtest kan men bepalen in hoeverre de bodem gerijpt is. Knijp hiervoor een veldmonster in de vuist. De bodem is:

- rijp ($n < 0,7$): het volledig monster blijft in de vuist,
- half-rijp ($n = 0,7 - 1,0$): de helft van het monster ontsnapt tussen vingers,
- onrijp ($n > 1,0$): het volledig monster ontsnapt tussen vingers.

128 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

De rijpingsfactor kan berekend worden aan de hand van rijpingsformules zoals bijvoorbeeld deze van Zonneveld (1960):

$n = (A - 0,2R)/(L + 3H)$ met

- A: % water in bodem op het terrein,
- R: % leem + zand,
- L: % klei,
- H: % organisch materiaal (% OC x 1,724)

De ontwatering van dieper gelegen onrijpe sedimenten heeft een onomkeerbare volumevermindering tot gevolg, waardoor de dikte van deze laag vermindert en het maaiveld daalt ten opzichte van een referentiepunt. Dit proces noemt men subsidentie of bodemdaling (figuren S87-S89). Dit heeft catastrofale gevolgen voor constructies zoals gebouwen, steden en wegen die gebouwd zijn op delta- of allu-

viale sedimenten. New Orleans (VS), Venetië (Italië), Jakarta (Indonesië) zijn enkele voorbeelden van steden die onderhevig zijn aan subsidentie.

In sommige delen van Jakarta is het bodemoppervlak in een dertigtal jaar al 3 m gezakt. De belangrijkste oorzaken van subsidentie in Jakarta zijn het onttrekken van grondwater, veranderingen in landgebruik en het toenemende gewicht van infrastructuur en constructies zijn de belangrijkste oorzaken van subsidentie. De bodemdaling, samen met de vermindering van de aanvoer van deltasedimenten door de constructie van dijken en de stijging van de zeespiegel, maken dat Jakarta enorm kwetsbaar is voor overstromingen (Abidin *et al.*, 2015).



Fig. S71-S72: Slib en drijfzand zijn gevaarlijk ... S71: Mont Saint-Michel, Frankrijk; S72: ©<https://www.australiangeographic.com.au/topics/science-environment/2021/09/the-truth-about-quicksand>.



Fig. S73-S74: Het uitdrogen van een onrijpe bodem is een onomkeerbaar proces met vorming van een prismastructuur. Corsica, Frankrijk; fig. S74: Vietnam.



Fig. S75: Wanneer de uitgedroogde bodem opnieuw onder water komt, zwelt de bodem niet en blijft het barstensysteem open. Dschang, Kameroen.



Fig. S76: Conchoïdale prismastructuur als gevolg van het snel uitdrogen van een recent gedraineerde polderbodem. Nieuwpoort, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. S77: Een gedraineerde veenbodem. Provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. S78: Een recent gedraineerde polderbodem, bewerkt tot zo'n 40 cm diepte. De originele rijpingsscheuren (barsten) blijven open. Noord-Nederland.



Fig. S79-S80: Een polderbodem die al meer dan een eeuw gedraineerd en bewerkt wordt. De rijpingsscheuren zijn nu gevuld met aarde afkomstig van de oppervlaktehorizont maar fungeren nog steeds als een drainerings- en wortelpenetratiesysteem. Jutland, Denemarken.



Fig. S81: Een kuil recent gevuld met aarde. Door nat/droog cycli heeft er zich een irreversibel barstensysteem ontwikkeld. Nancy, departement Meurthe-et-Moselle, France.



Fig. S82: Een 250 cm diepe vroegneolithische gracht. Blijkbaar had deze zone van de gracht, na de vulling, een fluctuerende grondwatertafel. Hierdoor heeft er een rijpingsproces plaatsgehad met de ontwikkeling van een barstensysteem. Fig. S82-S86: Waremmen, provincie Luik, België.

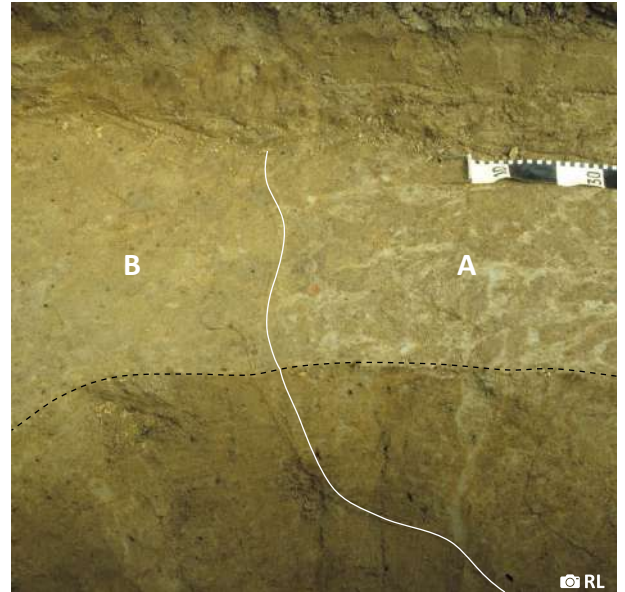


Fig. S83: Het barstensysteem is beperkt tot de gracht (A), de *in situ* bodem vertoont geen barsten (B).



Fig. S84: In het centrum van de gracht loopt een grotere barst (loodrecht op het meetlint).



Fig. S85: Detail van het barstensysteem dat vandaag niet meer actief is. Wortels dringen niet meer preferentieel door deze structuren.

◀ Fig. S86: Zelfde gracht in een zone waar er geen fluctuerende grondwatertafel was. Het barstensysteem is grotendeels afwezig.

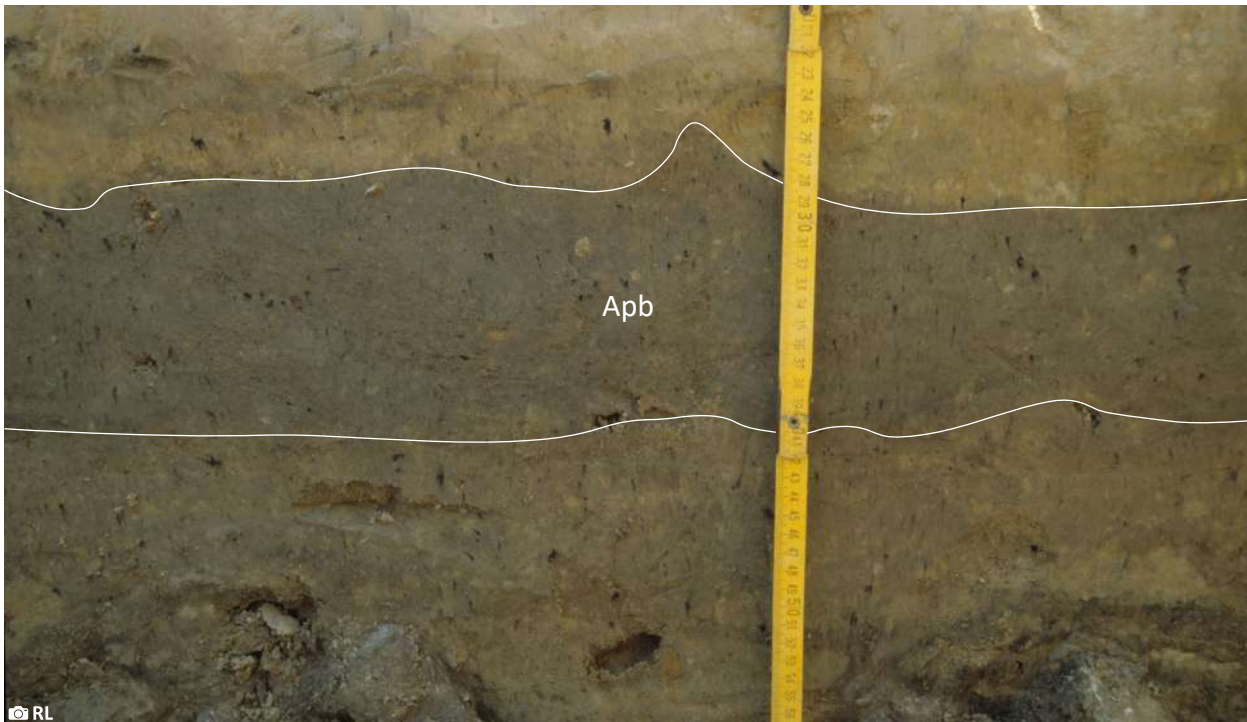


Fig. S87-S89: Mooi voorbeeld van subsidentie op een archeologische site. Een 6 m diepe waterput is abrupt gevuld met aarde. Vervolgens heeft men de oppervlaktebodem bewerkt en is er een 20 cm dikke donkergrijze ploeglaag gevormd. Nadien is de site verlaten en is de opgevulde aarde gaan 'rijpen'. Hierdoor is de originele ploeghorizont (A_{pb}) zo'n 1,5 m diep gezakt. Langs de wanden zijn er restanten van de dalende ploeglaag (links onder). Motte van Werken, provincie West-Vlaanderen, België.

De prismastructuur van de fragipan

Tijdens een vorstperiode dringt het vriesfront in de bodem. Wanneer de temperatuur terug stijgt, ontdooit de bevroren bodem. In zeer koude klimaten kan het echter gebeuren dat de bevroren bodem niet volledig ontdooit, wat leidt tot de vorming van **permafrost** (permanent bevroren deel van de bodem). Deze laag heeft een boven- en ondergrens. Bij verdere afkoeling van het klimaat zal de ondergrens van de permafrost geleidelijk aan dieper in de bodem dringen. Een kenmerk van een bevroren bodem is dat de grond heel sterk uitdroogt doordat water bevriest (vaste stof). Permafrost die diep in de bodem dringt, oefent een sterke zuigkracht uit op het water van de onderliggende bodemlagen. Dit leidt tot een extreme uitdroging. Afhankelijk van de textuur en de vochtigheidstoestand zal dit leiden tot sterke krimp en barstvorming met een prismatische structuur. Deze structuurontwikkeling begint bij de oorspronkelijke bovengrens van de permafrost.

Vanuit steeds diepere lagen wordt water aange trokken zodat de onderste grens van de permafrost steeds verder aangroeit: het water stijgt door de capillaire zuigkracht naar boven, doorheen de nog niet bevroren prismastructuren.

Langs de open krimpscheuren, die de prisma's afbakenen, kan het vriesfront echter nog dieper in de bodem doordringen. Water dat nu door de prisma's omhoog stijgt, migreert naar het dichtstbijzijnde vriesfront, in dit geval de barsten tussen de prisma's. Zodra het water dit vriesfront bereikt, bevriest het, eerst als ijsnaalden loodrecht op de prisma-wanden. Met toenemende watertoevoer kan een compact ijsblad gevormd worden dat geleidelijk druk uitoefent op de wanden van de nog niet bevroren prisma's. Dergelijke structuur van ijsbladen staat bekend als '*reticulate ice veins*' (Mackay, 1974).

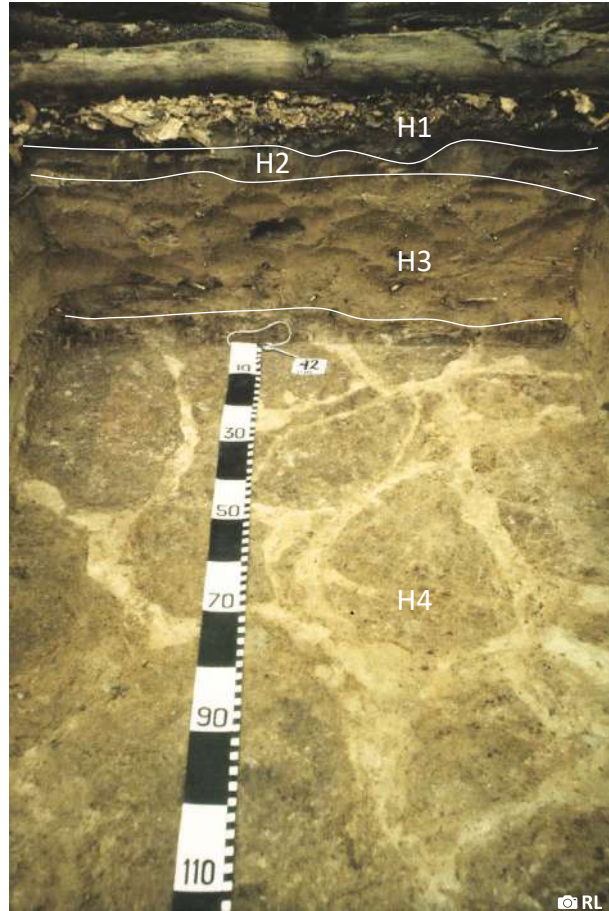
Naarmate de permafrost dieper in de bodem doordringt, ontwikkelt dit proces zich verder, met prisma's die meerdere meters diep kunnen gaan. Een bodem gekenmerkt door de aanwezigheid van een polygonaal patroon van compacte prisma's en gebleekte tongen noemt men een fragipan. In de Belgische leemstreek gaat de **fragipan** tot een diepte van 120 cm, op het Ardens plateau met een meer continentaal klimaat tot 150-160 cm (Bock *et al.*, 2010). In zeer poreuze bodems kunnen de verticale ijsbladen een aanzienlijke dikte bereiken van meer-

dere centimeters. Dergelijk barstensysteem kan onmogelijk het gevolg zijn van normale uitdroging.

De grootte van de prisma's hangt af van de vochtigheidsgraad en de textuur van de oorspronkelijke bodem. Bij weinig water zullen prisma's van de permafrost een diepere bovengrens hebben en een relatief grotere diameter (tot 60-80 cm). Bij veel bodemwater liggen de prisma's ondieper en hebben ze een kleinere diameter, soms minder dan een decimeter (figuren S90-S94). In zandige bodems, die minder water vasthouden, liggen de prisma's dieper en zijn ze groter dan in leembodems (figuur 95). Deze krimpscheuren zijn het resultaat van uitdroging gevolgd door de groei van ijsbladen, niet van thermische krimp die prisma's kan vormen van meerdere, soms tientallen meters diameter.

Na afloop van de permafrostperiode dooien de verticale ijsbladen, wat resulteert in open barsten die geleidelijk aan worden opgevuld met aarde vanuit de hogere bodemhorizonten. Het resultaat is een bodem met een opvallende prismastructuur met een abrupte bovengrens. De prisma's zelf zijn afgebakend door verticale barsten opgevuld met aarde uit de hogere horizonten en hebben sterk verdichte wanden. Water percoleert preferentieel door deze opgevolde barsten. Wortelpenetratie is ook beperkt tot deze structuren die minder dan 10 % van het bodemvolume innemen. Wegens de impact op de plantengroei, wordt dergelijke horizont door de bodemkundigen de 'fragipan' genoemd, afgeleid van '*frangere*, breken (Latijn)' en '*fragilis*, broos (Latijn)' vanwege de breekbaarheid van de aarde in deze horizont (compact maar niet gecementeerd) en 'pan' vanwege de sterke wortelbeperking (figuren S95-S96) (zie thema 'Periglaciale processen en kryo-turbatie').

Naast de hypothese van permafrost voor de ontwikkeling van een fragipan (e.g. Payton, 1992, 1993a, 1993b; Van Vliet & Langohr, 1981), bestaan er meerdere andere hypothesen, bijvoorbeeld bodemconsolidatie door vocht/droog cycli (e.g. Smalley & Davin, 1982, Bryant, 1989, Smalley *et al.*, 2016), lichte cementatie door siliciumverbindingen (e.g. Bridges & Bull, 1983) en vooral bodem 'degradatie' met verzuring en kleiafbraak. Een goed overzicht van kenmerken en genese van fragipans is te vinden in Smalley & Davin (1982) en Schaetzl & Thompson (2015, pp. 346-356).



H1: A1; slechts enkele cm dik, wat wijst op een zeer beperkte activiteit van borende dieren (regenwormen, mollen...).

H2: A2; dunne overgangshorizont.

H3: B β ; biologisch actieve horizont, talrijke wortels.

H4: Btx; fragipan horizont met scherpe bovengrens. Het horizontaal vlak toont het polygonaal patroon van de originele krimp-scheuren.

H5: Bt; diepere horizont zonder fragipan kenmerken.

Fig. S90-S91: Fragipan (35-120/130 cm) ontwikkeld in een reeds bestaande klei-illuvatie horizont (Bt). Zure leembodem, matig gedraineerde depressiepositie. Fig. S90: Verticale profielwand. Fig. S91: Horizontaal vlak. Zoniënwood, België. (Langohr, 2016).



Fig. S92-S93: Fragipan in slecht gedraineerde leembodem, plateaupositie. Fig. S92: verticale profielwand. Fig. S93: horizontaal vlak. De fragipan is ondieper en het polygonenpatroon veel fijner (vergelijk met fig. S90-S91). Zoniënwood, België. (Langohr, 2016).



Fig. S94: Fragipan in lemig zand. Goed gedraineerde plateaupositie. Fragipan begint op grotere diepte (vergelijk met fig. S92-S93). Zoniënwood, België.



Fig. S95: Fragipanstructuur met grote prisma's in zand; op 150 cm diepte volgen de wortels het prismapatroon. Provincie West-Vlaanderen, België.

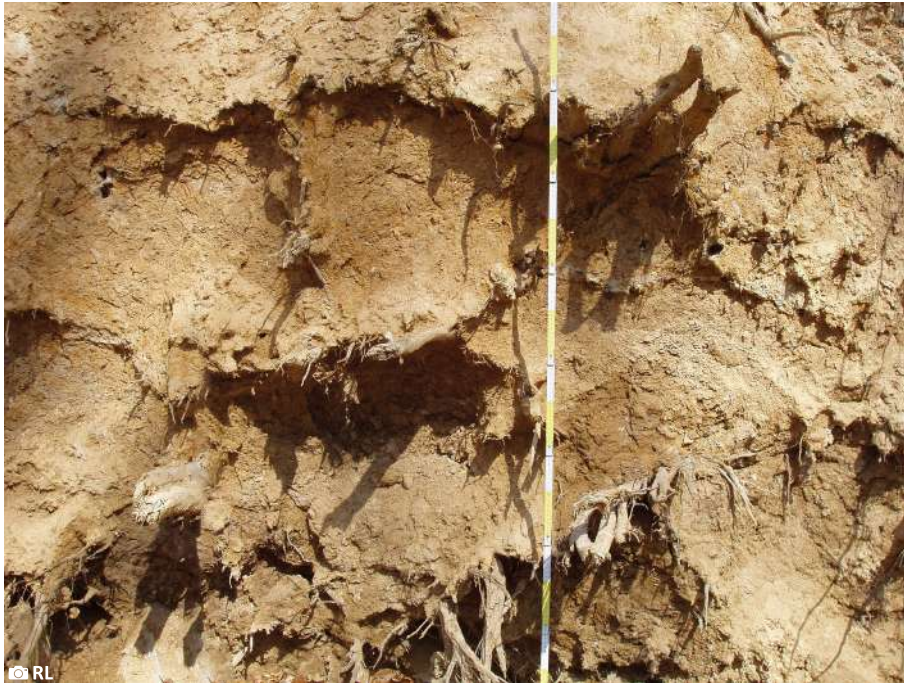
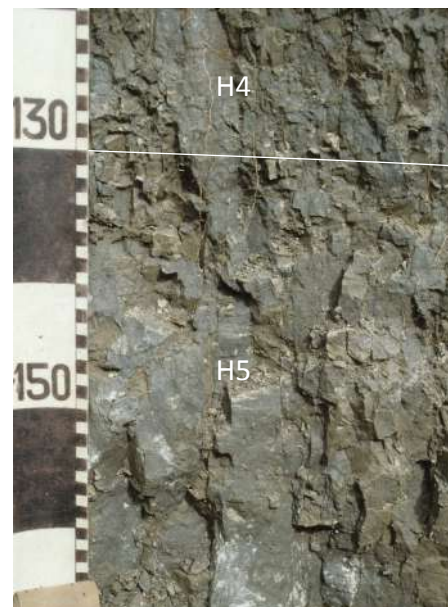
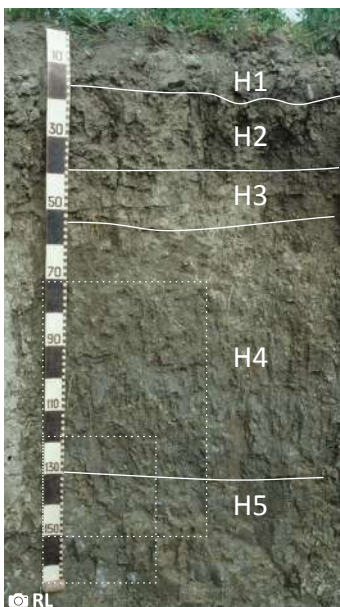


Fig. S96: Ter hoogte van de fragipan kunnen de boomwortels slechts langs het oude barsensysteem in de bodem dringen. Dit verlaagt sterk de fysieke fertiliteit van de bodem. Onderkant van een ontwortelde boom op ongeveer 80 cm diepte. Zoniënwood, België. (Langohr, 2016).

Vries/dooi prismastructuur

Een bevroren bodem oefent een zeer sterke zuigkracht uit op de onderliggende horizonten. Deze drogen uit met als gevolg de ontwikkeling van een

prismastructuur. Kenmerkend voor dit proces, wanneer de uitdroging bijzonder snel gebeurt, is de conchoïde morfologie van de prisma's (figuren S97-S99).



H1: humusrijke oppervlaktehorizont.

H2: prismastructuur met rechte wanden ontwikkeld door de zomerdroogte.

H3: diepte van de wintervorst, met vorming van een plaatstructuur door ijssegregatie.

H4 en H5: successie van kleine tot grote conchoïde prismastructuur ten gevolge van winteruitdroging onder een bevroren bodem. Deze structuureenheden zijn grotendeels onvolledig.

Fig. S97-S99: Impact van intense vries/dooi cycli op een kleirijke bodem. Fig. S97: verticale profielwand, fig. S98-S99: details van de conchoïde prismastructuur.

Merkwaardig is de ontwikkeling van een prismastructuur tot meer dan 150 cm diepte onder een klimaat waar de zomerdroogte tot amper 40 cm diepte reikt. Dergelijke bodems komen voor in een klimaatzone van het boreaal bos. Zuid-Noorwegen.

6.6. Vesiculaire (blaasvormige) structuur

De vesiculaire structuur is kenmerkend voor bodems waarvan het oppervlak verslempd is door regenneerslag. Verslemping is een vorm van structuurbederf waarbij door de impact van regendruppels de aggregaten uit elkaar vallen. Hierdoor worden de bodemdeeltjes dichter gestapeld en kan er zich een korst vormen aan het bodemoppervlak. Verslemping komt vooral voor op bodems die weinig organische stof bevatten en weinig of niet begroeid zijn. Na een periode van neerslag, draineert een fractie van het water van de waterverzadigde

horizont, juist onder de oppervlakkige korst, naar de diepere bodemlagen. Hierdoor vormt zich een horizont met vesiculaire porositeit (figuren S100-S106).

Wegens de discontinuïteit van dit poriënsysteem en de aanwezigheid van een oppervlaktekorst, is kolonisatie door vegetatie erg moeilijk en ook water percoleert bijna niet door deze structuur.

Dit type structuur is vooral beschreven voor woestijnbodems (e.g. Schaetzl & Thompson, 2015, pp 410-411), maar dit bodemgenetisch proces komt ook voor in verslempde bodems op bijvoorbeeld akkerland en slibafzettingen.



Fig. S100-S101: Een verslempd bodemoppervlak met vesiculaire horizont. Tromsø, Noord-Noorwegen.



Fig. S102-S104: Een leembodem onder akkerland, met verslempd oppervlak en vesiculaire structuur. Leemstreek, België.



Fig. S105: Slib in een getijdeland. Le Hourdel, departement Somme, Frankrijk. Fig. S106: Goed ontwikkelde vesiculaire structuur. Land van Saeftinghe, Nederland.

6.7. Bodems zonder structuur

Bodemhorizonten of -lagen zonder natuurlijke aggregaten noemt men 'loskorrelig' voor zandige texturen (figuren S107, S110) en 'massief' voor alle andere texturen (figuren S108, S109).



Fig. S107: Zandprofiel in de kustduinen. Loskorrelig, structuurloos. Vanaf 25 cm diepte duidelijke stratificatie. Dit is geen bodemstructuur maar een gelaagde afzetting door de wind. Vlaams natuurreservaat De Westhoek, De Panne, België.

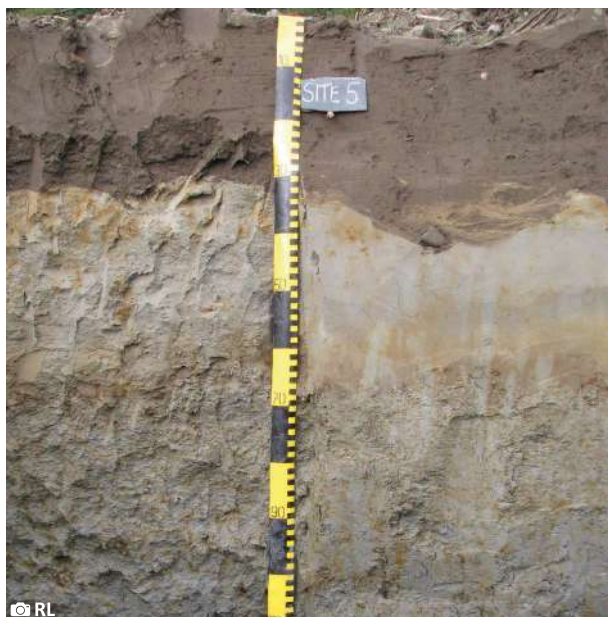


Fig. S109: Leemtextuur. Tot 70 cm diepte is de bodem massief door de compacte ploeglaag en de ploegzool. Vanaf 70 cm is er een onvolledige hoekige blokstructuur. Zuid-Noorwegen.



Fig. S108: Bodemprofiel ontwikkeld in kleiige leem. Tot 100 cm diepte is er een plaat- en lenticulaire structuur te wijten aan vries/dooi. Vanaf 100 cm diepte is de bodem massief, dit wil zeggen zonder bodemstructuur. Zuidwest-Noorwegen.



Fig. S110: Bodem ontwikkeld in dekzanden. 0-25 cm: massieve ploeglaag. 25-45 cm: kleur-B horizont met fijne plaatstructuur wegens vries/dooi. Vanaf 45 cm: massief. Aalter, provincie West-Vlaanderen, België.

7. Druk en compactie in bodems

7.1. Druk en bodemkleur

Een sterk verdichte bodem bevat weinig poriën. Hierdoor kan er een omgeving ontstaan waar er geen zuurstof meer aanwezig is, een ‘anaerobe’ toestand. IJzer, een belangrijke kleurstof in de bodem, zal in zo’n milieu omgezet worden van geoxideerd (Fe^{3+}) naar gereduceerd ijzer (Fe^{2+}). Geoxideerd ijzer is rood tot geelbruin gekleurd, gereduceerd ijzer is kleurloos en oplosbaar (zie thema ‘Bodemkleur’). Zo kan gereduceerd ijzer migreren uit de verdichte zone naar de omliggende zuurstofhoudende bodem. Op de grens tussen beide eenheden kan het ijzer neerslaan als geoxideerd ijzer, wat morfologisch goed observeerbaar is als een oranje, rood of bruin gekleurd bandje.

7.2. Vries/dooi cycli en druk in het bodemprofiel

(zie ook thema ‘Periglaciale processen en krypturbatie’)

Door het proces van intern zwellen ontstaat er druk in het bodemprofiel. Twee aspecten zijn hier belangrijk: vries/dooi (§7.2) en vochtig/droog cycli (§7.3).

Wanneer water bevriest, neemt het ijs 9 % meer volume in dan het water. Het bevroren van een bodem met waterverzadigde horizonten of -lagen met verschillende textuur kan een zeer hoge druk veroorzaken. Bodemhorizonten of -lagen die meer water bevatten, zoals deze met een zandige textuur, zullen sneller bevroren aangezien het water minder gebonden is aan de minerale korrels. Door ijsvorming treedt er een volumeverhoging op, die een sterke druk uitoefent op de nog niet bevroren bodemhorizonten of -lagen. Dit proces, dat zich

telkens herhaalt tijdens de vries/dooi cycli, veroorzaakt involuties of instulpingen van de verschillende bodemhorizonten of -lagen (figuren S114-S115). Dit kan ook een impact hebben op het bodemoppervlak dat kleine bulten en depressies zal vertonen.

Ijssegregatie onder stenen (artefacten...) kan deze naar boven drukken. In extreme gevallen kunnen zo lithische fragmenten uit de bodem gedrukt worden. De segregatie van belangrijke hoeveelheden ijs in de bodem kunnen door volumeverhoging, het bodemoppervlak doen stijgen. Deze druk is voldoende om wegen en zelfs gebouwen op te tillen (figuren S111-S113).

De ontwikkeling van permafrost kan door de druk van ijsbladen de wanden van een prismastructuur samendrukken (zie §6.5.5. ‘De prismastructuur van de fragipan’).

7.3. Vochtig/droog cycli en druk in bodems met zwellende kleien

Dit proces is beschreven in §6.5.1. ‘De vertisol prismastructuur’. Ook hier gaat het bodemoppervlak bulten en depressies vertonen, ‘*gilgai*’ genoemd. Dit zwel/krimp proces is verantwoordelijk voor belangrijke schade aan antropogene structuren zoals woningen, ondergrondse citernen, pijplijnen, wegen. Het is dan ook een belangrijke schadepost bij de verzekeringsinstellingen.



Fig. S111: De steen is aan de rechterzijde opgetild door ijsseregatie. Lapland, Finland.



Fig. S112: Stenen worden uit de bodem getild. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje, 2700 m hoogte.



Fig. S113: Stenen zijn uit de bodem gedrukt en vormen gesorteerde polygonen/cirkels op plateaupositie. Northern Territories, Canada.

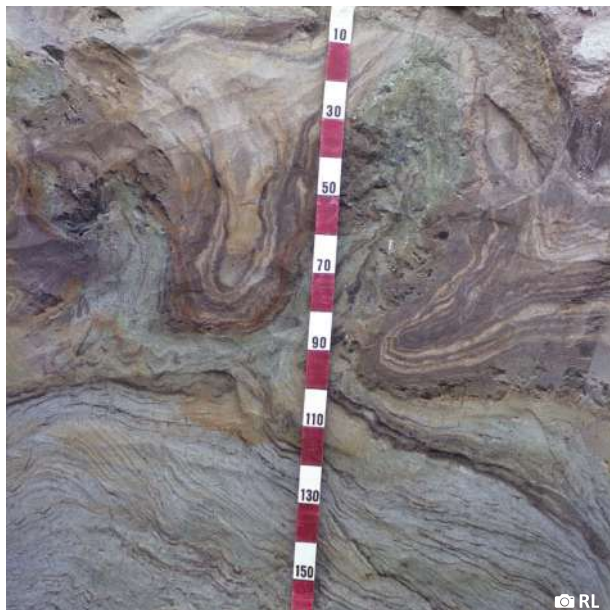


Fig. S114: Uitgesproken kryoturbatie van een zandige bodem die een instulping (involutie) vormt in een kleisubstraat. Condroz, België.



◀ Fig. S115: Een humusrijke horizont volledig verstoord door kryoturbatie ('druppelbodem'). Provincie Oost-Vlaanderen, België.

7.4. Vegetatie en druk in de bodem

Bomen kunnen ook een belangrijke druk uitoefenen in de bodem (figuren S116-S117). Deze druk is niet zozeer te wijten aan het gewicht van de boom en de wortelgroei. Het is het bewegen van de boom dat een belangrijke rol speelt, vooral tijdens perioden van sterke wind en een natte bodem. Door het trekken en duwen van de boom ontstaat er een sterke druk in de bodem ter hoogte van het wortelstelsel. Deze druk is niet gelijkmatig verdeeld langsheen de wortels: volgens de wortelconfiguratie wordt er plaatselijk een sterke druk uitgeoefend, op andere plaatsen is er geen impact (figuren S118-S119). Plaatselijk is de bodem eveneens tussen de groeiende wortels ter hoogte van de boomstronk sterk samengedrukt.

Wanneer slechts oppervlakkige wortels aanwezig zijn, kan een boom tijdens een storm beginnen wiegen. Indien de oppervlakkige bodemhorizonten op dat ogenblik waterverzadigd zijn, kan deze op- en neerbeweging, die zich uitstrekt tot enkele meters rond de boomstam, zo'n sterke druk uitoefenen dat modder uit de bodem spuit. Boswachters noemen dit een 'pomper'. Dit is het signaal dat het risico bestaat dat de boom zal omvallen. (figuur S122).

In de bodem kan men de (vroegere) aanwezigheid van een wiegende boom herkennen aan de hand van min of meer horizontale zones met gestratificeerde sedimenten. Het zijn afwisselend laagjes gebleekte aarde (kwarts) en zwart humusrijk materiaal. Wanneer de wortelkluit omhoog wordt getild, oefent ze een zuigkracht uit waardoor water ondergronds naar deze plaats wordt gezogen. Bij de neerwaartse beweging wordt dit water onder druk gezet en vloeien water en bodemdeeltjes weg van de zone die samengedruwd wordt in de richting van de zone die uit elkaar wordt getrokken. De krachtige heen- en weerbeweging van het water verklaart deze speciale gestratificeerde morfologie in de bodemhorizonten (Langohr & Louwagie, 2000).

Vallende takken kunnen in de bodem dringen. Een eerste type is het afbreken van een dode tak. De dode tak valt van enkele tientallen meters hoog en heeft voldoende kracht om enkele decimeters diep in de grond te dringen. Soms zit de tak zo diep in de grond, zodat het niet mogelijk is om de tak uit de grond te trekken. Het tweede type van takken die in de bodem dringen, heeft te maken met de val van de boom (figuur S120). De takken die min

of meer loodrecht op de stam groeien, breken bij de val van de boom af. Wanneer ze de grond raken, kan de overblijvende stomp met een enorme kracht in de bodem worden gedruwd. Het is niet uitzonderlijk dat de afgebroken tak 1 meter en dieper in de bodem dringt en terzelfdertijd de bodem rond de tak sterk samendrukt (figuur S121). Soms interpreteren archeologen dergelijke structuren als sporen van paalgaten. Gelukkig zijn er enkele specifieke kenmerken die het mogelijk maken om echte paalgaten te onderscheiden van deze boomtakken die op natuurlijke wijze in de bodem zijn gedreven ('pseudo'-paalgaten). Tegenwoordig worden dergelijke kenmerken beter herkend door archeologen (Van Moerkerke *et al.*, 2019) (zie thema 'Bodembioturbatie door planten').

7.5. Neerslaan en groei van kristallen en concreties uit een oververzadigde bodemoplossing

Het neerslaan en de groei van kristallen en concreties uit een oververzadigde bodemoplossing, treedt vooral op bij de groei van kalk- (CaCO_3) en gipskristallen ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

In het geval van gips kan de groei van kristallen een belangrijke impact hebben op bijvoorbeeld monumenten opgetrokken uit kalkhoudende zandsteen. Wanneer het regenwater zwavel bevat, vooral bij pollutie door het verbranden van steenkool en zwavel bevattende brandstoffen, en in het gesteente dringt langs microporiën, zal er zich eerst anhydriet (CaSO_4) vormen door het contact met de kalk van het gesteente. Vervolgens zal het anhydriet hydrateren tot gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Gips heeft echter een volume dat 60 % groter is dan anhydriet, met als gevolg een sterke interne druk in het gesteente dat geleidelijk aan zal verbrokkelen. Dit is, naast de oplossing van kalk door het regenwater en de ijssegregatie, een van de belangrijke vormen van erosie van historische gebouwen.



Fig. S116: 'General Sherman', een *Sequoiadendron giganteum*. Deze boom meet 83 m hoog, heeft een omtrek van 30 m en een straal van 4,76 m. Het volume geschat op 1400 m³ en een gewicht van 1200 ton op een oppervlak van 71,15 m², geeft een druk van slechts 1-2 kg/cm². California, USA.



Fig. S118: De groeiende wortels onder de boomstronk hebben de bodem sterk verdicht, te zien aan de bleke kleur door zuurstofgebrek. Zoniënwood, België.



Fig. S117: Grafstenen worden opgetild door de druk van groeiende wortels. Kerkhof Père Lachaise, Parijs, Frankrijk.

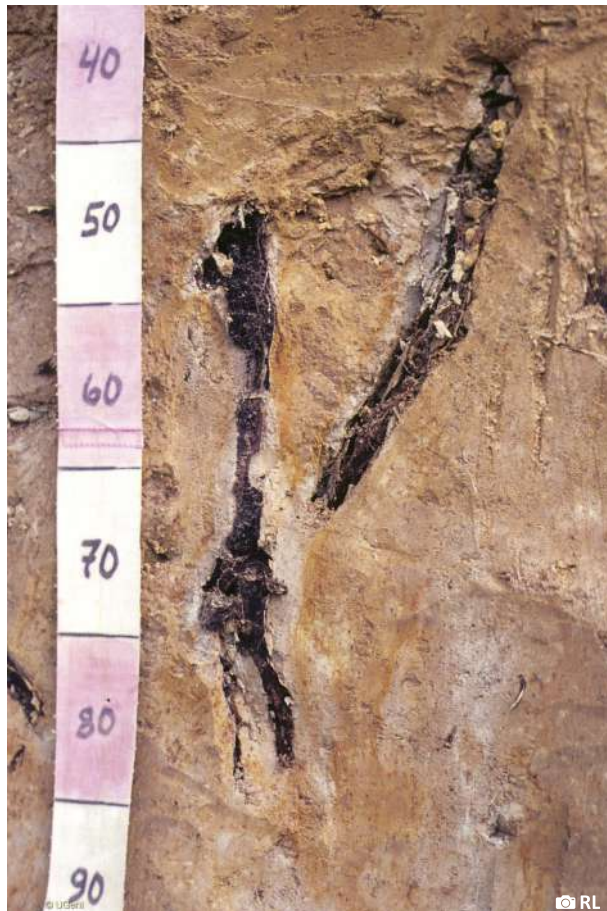


Fig. S119: Door het wiegen van de boom ontstaat er sterke druk langsheen het wortelstelsel. In functie van de wortelmorfologie is deze druk discontinu zoals geïllustreerd door de gebleekte zones. Ellezelles, provincie Henegouwen, België.



Fig. S120: Een gebroken tak van een gevallen beuk is in de bodem gedrongen. Park Sint-Pieters-Woluwe, België.



Fig. S122: Een wiegende boom in een periode van sterke waterverzadiging. Dit veroorzaakt druk en expansie van modder uit de bodem. Zoniënwood, Ukkel, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België.

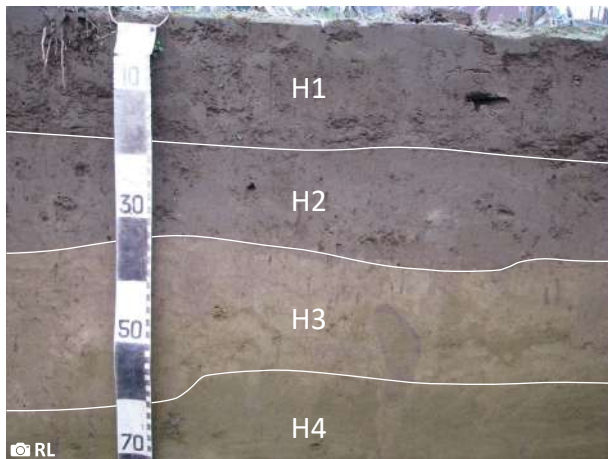


Fig. S121: De gebroken tak (A) is tot 120 cm diep in de leembodem gedrongen. Dit veroorzaakt een zeer sterk samengedrukte bodem (B) langsheen de tak. Leemstreek, Velzeke, provincie Oost-Vlaanderen, België.

7.6. Permanente verdichting door menselijke impact

Er zijn talrijke processen van bodemverdichting die verband houden met menselijke activiteiten:

- landbouw: ploegzool (En.: *plough pan*), een van de problemen voor een goede gewasproductie in de landbouw (figuren S123, S124); bodemverdichting door te intensieve betreding van vee (zie thema 'Bodembioturbatie door dieren'),
- bosbouw: oppervlakkige bodemverdichting in bosbestanden door verkeer van machines (figuren S125-S126, S128-S130) (En.: *traffic pan*),
- recreatie: paarden, fietsers... (figuur S129) (En.: *traffic pan*),
- verkeer: paden, wegen (figuren S131, S132-S134),
- bouwen van constructies (figuur S135).



H1: Ap1; 0-8 cm: huidige bewerkingshorizont.

H2: Ap2; 8-32 cm: onderste deel van de originele ploeglaag, sterk verdicht door bodembewerking, een ploegzool (Apd).

H3: Bbi 32-55/60 cm: sterk gebioturbeerd.

H4: C 55/60+ cm: moedermateriaal met glauconiethoudend zand.

Fig. S123: Bodemprofiel met bewerkingshorizont (H1) en ploegzool (H2). Leembodem, Diest, provincie Vlaams-Brabant, België.

Fig. S124: Een bodem begraven onder een wegdek met grind. ► De originele poreuze humusrijke (grijze) oppervlaktehorizont (vanaf 16 cm) is sterk samengedrukt waardoor ijzer migreerde en neersloeg op het contact met de onderliggende horizont (28/29 cm op de meetlat). Budapest, Hongarije.





Fig. S125: Verdichte bodem door onbeteugelde bosontginning. Meer dan 50 % van het bodemoppervlak is aangetast. Figuren S125-S130 zijn genomen in het Zoniënwood, België.



Fig. S126: De bodemverdichting is zo algemeen dat het regenwater nog moeilijk in de bodem dringt.



Fig. S127: Groei van Waterpeper (*Polygonum hydropiper*) op de zones waar de bodem door recreatie met paarden zeer sterk verdicht is. Het water stagneert en bevordert de groei van tredvegetatie. Dit beeld illustreert dat beschikbaar water de belangrijkste factor is voor de plantengroei.



Fig. S128: Bodemtranssect door een verkeersstrook (tussen stippellijnen). Links typische 'stagnogley' (= stagnerend water) morfologie met ijzer dat in zuurstofloze omstandigheden oplosbaar wordt. Het ijzer migreert tot een zone met meer open poriën en zuurstof en slaat daar neer onder de vorm van een ijzerbandje. De bodem is zeer compact en de mate van reductie is indicatief voor de duur van stagnatie van oppervlaktewater.



Fig. S129-130: Detail van fig. S128. Fig. S129 toont een sterke stagnogley in de zone waar bosontginningsvoertuigen reden; op fig. S130 is een zeer lichte verdichting van de bodem buiten het spoor van de intensieve betreding te zien.



Fig. S131: Bodemverdichting door verkeer in een alluviale bodem. Nancy, departement Meurthe-et-Moselle, Frankrijk.

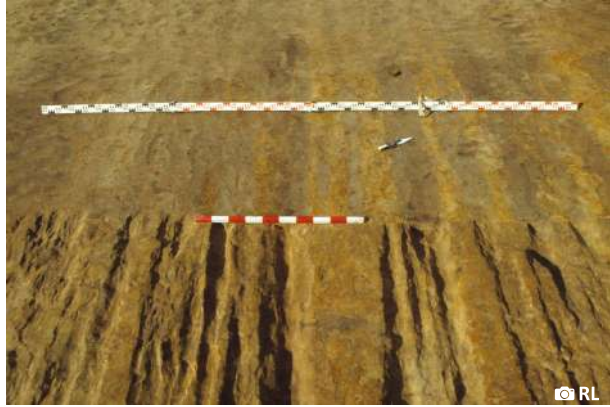


Fig. S132: Bodemverdichting door verkeer (karrensporen uit de Romeinse periode) in een zandige bodem. Op de onderste helft van de foto is het grijze humeuze zand dat de karrensporen opvulde, weggeborsteld. Verrebroek, provincie Oost-Vlaanderen, België.

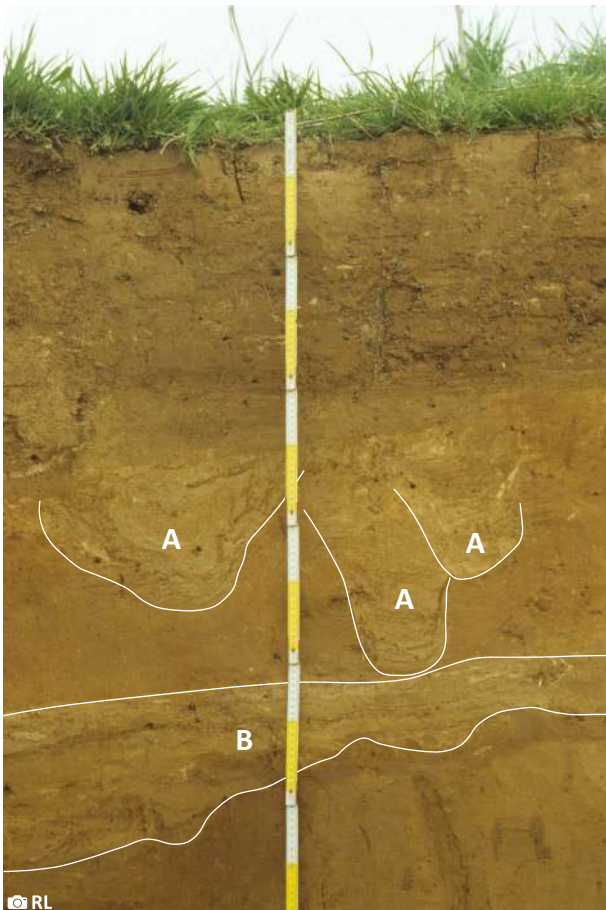


Fig. S133: Bodemverdichting door verkeer. Tussen 80-100 cm een horizontale gebleekte horizont van een wegdek (B), daarboven twee instulpingen van karrensporen (A). Leemstreek, Roberst, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. S134: Detail van het karrenspoor. De gebleekte structuur vertoont ijzerbandjes op een lensstructuur te wijten aan vries/dooi.



Fig. S135: Bodemverdichting onder een paalgat te zien aan de gebleekte zone met ijzerrand. Corroy-le-Grand, provincie Waals-Brabant, België.

REFERENTIES

- Abidin, H., Andreas, H., Gumilar, I. & Wibowo, I., 2015. On correlation between urban development, land subsidence and flooding phenomena in Jakarta. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 370, 15-20. DOI: 10.5194/piahs-372-115-2015
- Bock, L., Engels, P., Langohr, R. & Yans, J. 2010. Field trip to Hoyoux valley and Transinne quarry. The Transinne quarry. 7 September 2010, 12-27. Soil Science Society Belgium.
- Brady, N. & Weil, R., 2008. *The Nature and Properties of Soils*. 14th ed., Pearson Prentice Hall, 975 pp.
- Bridges, E. & Bull, P., 1983. The role of silica in the formation of compact and indurated horizons in soils of South Wales. In: *Soil Micromorphology. Proceedings of the 6th International Working Meeting on Soil Micromorphology* (Eds. Bullock, P. & Murphy, C.), 605-613. Berkhamsted, AB Academic publishers, 705 pp.
- Bryant, R., 1989. Physical processes in fragipan formation. In: *Fragipans: Their Occurrence, Classification, and Genesis* (Eds. Smeck, N. & Ciolkosz, E.), 141-150. Soil Science Society of America, Special Publication No. 24, Madison, Wisconsin, 153 pp.
- Galavi, V. & Schweiger, H., 2009. A multilaminate model with destructuration considering anisotropic strength and anisotropic bonding. *Soils and Foundations*, 49, 3, 341-353.
- Langohr, R., 2016. La Forêt de Soignes – Site unique pour les sciences de la terre et l'archéologie. Comprendre l'évolution du paysage pédologique dans la région des loess en Belgique. Le facteur édaphique dans l'écologie forestière. Un aperçu de 45 ans de recherche. Excursion 08 Juillet 2016, Association Française des Sols – Soil Science Society of Belgium, 29 pp.
- Langohr, R. & Pieters, M., 1990. The paleosoils of the middle Kapthurin Formation. In: *The Kapthurin Formation revisited* (Eds. Cornelissen, E. et al.). The African Archaeological Review, 8, 51-58.
- Langohr, R. & Louwagie, G., 2000. Tree sway turbation of soils as observed on archaeological sites in the sandy area of northern Flanders, Belgium. *Pedologie – Thematika*, 8, 123-129.
- Mackay, R., 1974. Reticular ice veins in permafrost, Northern Canada. *Canadian geotechnical Journal*, 11, 230-237.
- Payton, R., 1992. Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. I. Evidence for a periglacial stage of development. *European Journal of Soil Science*, 43, 4, 621-644.
- Payton, R., 1993a. Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. II. Post Devensian developmental processes and the origin of fragipan consistence. *European journal of Soil Science*, 44, 4, 703-723.
- Payton, R., 1993b. Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. III. Micromorphological, SEM and EDXRA studies of fragipan degradation and the development of glossic features. *European journal of Soil Science*, 44, 4, 725-739.
- Schaetzl, R. & Thompson, M., 2015. *Soils, Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, 778 pp.
- Smalley, I., Bentley, S. & Markovic S., 2016. Loess and fragipans: Development of polygonal-crack-network structures in fragipan horizons in loess ground. *Quaternary International*, 399, 228-233.
- Smalley, I. & Davin, J., 1982. *Fragipan horizons in soils: a bibliographic study and review of some of the hard layers in loess and other materials*. New Zealand Soil Bureau Bibliographic Report, 30, 122 pp.
- Vanmoerkerke, J., Tegel, W. & Laurelut, C., 2019. Les faux poteaux plantés. In: *Soils as records of past and present. From soil surveys to archaeological sites: research strategies for interpreting soil characteristics* (Eds. Deák, J., Ampe, C. & Mikkelsen, J.), 113-119. Proceedings of the Geoarchaeological Meeting, Bruges (Belgium), 6 & 7 November 2019. Raakvlak, Bruges, 319 pp.
- Van Vliet, B. & Langohr, R., 1981. Correlation between fragipans and permafrost with special reference to silty Weichselian deposits in Belgium and northern France. *Catena*, 8 (1), 137-154.
- Zonneveld, I., 1960. *De Brabantse Biesbosch*. Bodemkundige studies no 4. Stichting voor bodemkartering, Wageningen, 210 pp.

Geraadpleegde websites op 10/09/2025

- <https://alchetron.com/Gilgai>
- <https://buildfree.org/foundation-repairs.html>
- <https://getinthering.co/land-subsidence>
- <https://www.australiangeographic.com.au/topics/science-environment/2021/09/the-truth-about-quicksand>
- <https://www.uidaho.edu/cals/soil-orders/vertisols>

IN DIALOOG MET BODEMS VELDBODEMKUNDE VOOR ARCHEOLOGISCH ONDERZOEK



ORGANISCHE EN MINERALE (KLEI) COLLOÏDENMIGRATIE

AUTEURS : ROGER LANGOHR
CAROLE AMPE
JARI HINSCH MIKKELSEN

1. Inleiding

De migratie van klei en fijne humusdeeltjes (of kortweg kleimigratie) is een natuurlijk bodemproces. Deze verplaatsing van de bodemdeeltjes gebeurt met het bodemwater en verloopt hoofdzakelijk verticaal. Dieper in het bodemprofiel slaan deze bodemdeeltjes neer. Er is dus een uitlogings- of eluviatiehorizont (E-horizont) van waaruit de colloïden migreren en een aanrijdings- of illuviatiehorizont (Bt-horizont) waar ze neerslaan of accumuleren. Vooraleer kleimigratie kan gebeuren, moeten een aantal voorwaarden vervuld zijn. Zo is kleimigratie niet mogelijk wanneer de bodem kalkrijk is, maar ook bij te zure bodems kan er geen kleimigratie plaatsgrijpen (zie §2). Wanneer de te zure bodem bemest en bekalkt wordt door menselijke activiteiten, kan het kleimigratieproces gereactiveerd worden. Het is dus belangrijk om dit bodemproces te begrijpen in archeologische contexten.

Er zijn drie belangrijke redenen om kleimigratie hier toe te lichten:

- vele bodems van het Belgische bodemlandschap hebben kleimigratie ondergaan (figuren C1-C4, C8-C11, C15-C20);
- de huidige kenmerken van de aanrijdingshorizonten van klei- en organische colloïden in landbouwgronden en archeologische structuren zijn op zijn minst verbonden aan menselijke activiteiten, zoals bodembewerking en bekalken (figuren C26, C28-C31, C45-C48);
- vele archeologische structuren in België, bijvoorbeeld *tumuli*, aarden wallen, put- en grachtvullingen, vertonen kenmerken van migratie van klei al dan niet vergezeld van organisch materiaal (figuren C5, C6, C12, C21-C60).

Kleimigratie in bodems met weinig of geen menselijke invloed (Figuren C1-C4, C8-C11)



H1: O; strooisellaag.

H2: A; enkele cm dikke donkergrijze humusaanrijking.

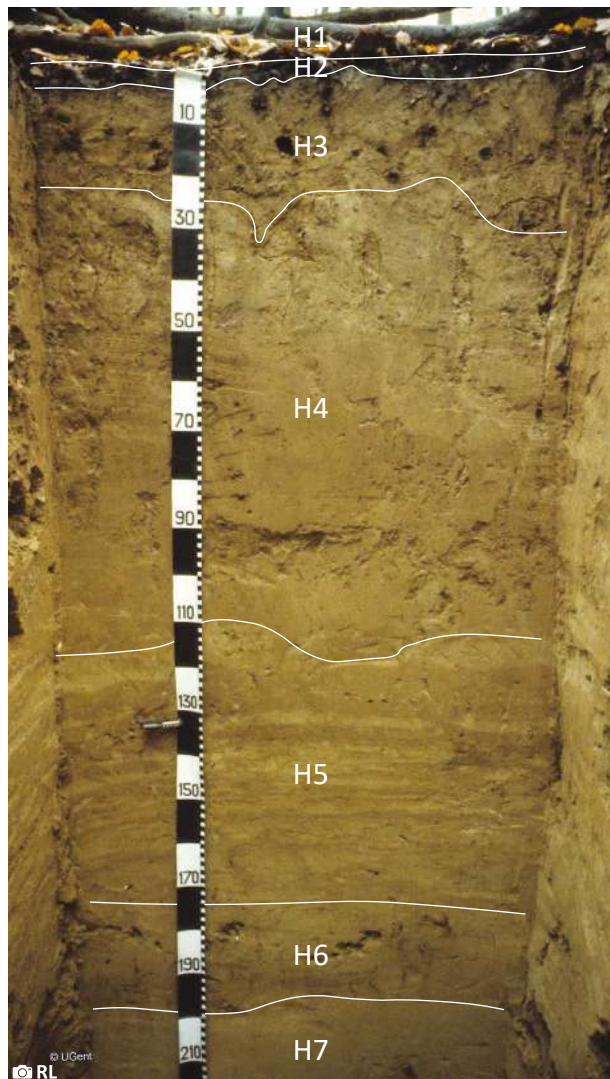
H3: Ap; grijsbeige humusaanrijking veroorzaakt door een korte periode van bodembewerking met als gevolg een 10-15 cm colluviale accumulatie.

H4: E; lichtbeige klei-uitlogingshorizont; de lichtere kleur is te wijten aan de eluvatie van de kleifraction die doorgaans een bruine kleur heeft door ijzeradsorptie op de kleideeltjes.

H5: Btx; donkerbruine klei-aanrijdingshorizont met fragipan; de wortels bevinden zich alleen in de lichtgekleurde min of meer verticale strepen. De bruinere kleur is te wijten aan de klei-illuviatie.

H6: E/Bt; vanaf 110 cm is er een afwisseling van lichter gekleurde, enkele centimeters dikke banden met minder klei (E-bandjes), en donkerbruine banden met meer klei (Bt-bandjes).

Fig. C1: Goed gedraineerde bodem ontwikkeld in löss, onder gemengd loofhout, aan de voet van een helling. De E/Bt-bandjes (H6) stoppen typisch 20-50 cm boven de ontkalkingsgrens. In deze bodem van het Kravaalbos werd de ontkalkingsgrens bereikt op ongeveer 250 cm diepte. Tussen de onderkant van de E/Bt-horizont en de ontkalkingsgrens is er een horizont waar de pH nog te hoog is voor het dispergeren van de klei en er nog ontkalking gebeurt. Tijdens de bodemkartering in België werden de E/Bt-bandjes soms als een B3-horizont of soms als een C-horizont beschreven. Vandaag weten we dat het om een bodemgenetisch en niet om een sedimentologisch proces gaat. Meldert, provincie Oost-Vlaanderen, België.



H1: +3-0 cm: O; dunne strooisellaag van beukenbladeren.

H2: 0-2/4 cm: A; zwarte humusrijke oppervlaktehorizont.

H3: 2/4-25/30 cm: B β ; biologisch actieve horizont met talrijke boomwortels, iets lichter gekleurd door kleiuitloging.

H4: 25/30-110/115 cm: Bt; klei-aanrijkingshorizont, horizont met de meest uitgesproken klei-aanrijking.

H5: 110/115-175 cm: E/Bt; opeenvolging van licht gekleurde klei-uitlogings- en bruinere klei-aanrijkingsschichten en -banden.

H6: 175-196 cm: Bw; ontcalcite horizont, zonder migratiebanden en talrijke wortels.
196 cm: messcherpe ontcalcite grens (het proces van ontcalcite is nog steeds actief).

H7: 196-215 cm: C; kalkrijke löss; bevat ongeveer 10 % kalk, origineel moedermateriaal van de bodem.

Fig. C2: Een leembodem die nooit onder landbouw is geweest, op een helling van 20 % gericht naar het noorden. Zoniënwood, Ukkel, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België. (Langohr, 2016: profiel 9, 18-19).



Fig. C3-C4: IJswigpseudomorf, een voormalige ijswigstructuur opgevuld met bodemmateriaal (links), met detailfoto (rechts). Dit is geen vroegneolithische gracht. De lössvulling in het midden van de structuur is afkomstig van de hoger gelegen bodemlagen. Oorspronkelijk was dit materiaal kalkrijk. Tijdens de latere ontcalcite is de volledige vulling van de structuur opgebouwd uit klei-uitlogings- en klei-aanrijkingsschichten. De omliggende lössbodem zelf heeft een iets meer intense beige kleur, kenmerkend voor de oudere Hesbayaan löss. Vieux-Waleffe, provincie Luik, België. (bijvoorbeeld Cahen et al., 1989).

2. Basiskenmerken van bodemcolloïden

Colloïden in de bodem zijn vaste deeltjes met een diameter kleiner dan 1 μm . Ze bestaan voornamelijk uit kleimineralen en/of organisch materiaal. De kleimineralen zijn **deeltjes die een elektrische lading bezitten**; bij de meeste kleimineralen is deze overwegend negatief. In de bodem kan de fractie kleiner dan 1 μm ook bestaan uit **organische colloïden**.

Colloïden zijn zo klein, dat ze in verhouding een uitzonderlijk groot oppervlak hebben. Een gram colloïden kan zo een oppervlakte van 100 en meer vierkante meter bezitten. Een ploeglaag van 30 cm dik met 10 % klei bezit zo een actief oppervlak van 10 tot 150 km^2 naargelang het type kleimineraal (Verheye & Amerijckx, 2007; Brady & Weil, 2008).

De bodemcolloïden komen voor onder twee fysische vormen: **gedispergeerd** en **geflocculeerd (uitgevlokt)**. De gedispergeerde vorm is het resultaat van het proces van peptisatie waarbij deeltjes met een gelijke lading elkaar afstoten en opnieuw in suspensie worden gebracht. De geflocculeerde vorm ontstaat door coagulatie of samenvlokken waarbij de deeltjes elkaar aantrekken. Een voorbeeld van een gedispergeerde vloeistof is melk. Na het toevoegen van een coagulant zoals stremsel zal de melk flocculeren en wordt er kaas gevormd.

Het proces van dispersie, waarbij deeltjes elkaar afstoten, en het proces van flocculatie, waarbij de deeltjes elkaar aantrekken, is het gevolg van een overwegend negatieve elektrische lading van de minerale en organische bodemcolloïden en de laag geadsorbeerd water op deze colloïden. De mate waarin een bodem kationen kan vasthouden, noemt men de sorptiecapaciteit van de bodem. De sorptiecapaciteit wordt bepaald door de hoeveelheid klei en humus en het type klei in de bodem. De bodem op zich zal altijd een neutraal geladen geheel vormen omdat de bodem ionen met een positieve lading (kationen) aantrekt.

De belangrijkste kationen zijn:

- waterstof (H^+),
- kalium (K^+),
- natrium (Na^+),
- calcium (Ca^{2+}),
- magnesium (Mg^{2+}),
- aluminium (Al^{3+}),
- ijzer (Fe^{3+}).

Van deze kationen zijn Ca^{2+} en Al^{3+} sterke flocculanten, de kationen Na^+ en K^+ bevorderen dispersie. Het al dan niet flocculeren houdt verband met de pH van de bodem (zuurtegraad). Bodems met veel calcium hebben een hoge $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ($> 6,5$ – of alkalische bodems), bodems met veel aluminium kationen hebben een lage $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ($< 5,0$ – of zure bodems). De situatie tussen een $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 5,0 tot 6,5, komt overeen met een milieu waar de minerale en organische colloïden kunnen dispergeren en migreren met het percolerend water. Het eluvatie - illuvatieproces is dus geen oplossing zoals bijvoorbeeld zout in water of het oplossen van organische stoffen in het podzoliseringsproces. Het zijn bodemdeeltjes die migreren in een suspensie.

Onder de kationen die een negatieve lading neutraliseren, zijn K^+ , Na^+ , Ca^{2+} en Mg^{2+} belangrijke nutriënten voor planten, H^+ is geen voedingsstof, en Al^{3+} wordt al snel toxisch voor de meeste plantensoorten. Daarenboven draagt Al^{3+} bij tot een lage pH van de bodem. Bodems met veel H^+ en/of Al^{3+} zijn dus zuur en voedingsarm voor planten. Kalkrijke bodems zijn over het algemeen rijk aan plantennutriënten, vooral met Ca^{2+} . De kationen K^+ , Na^+ , Ca^{2+} en Mg^{2+} zijn zeer oplosbaar. Dankzij de adsorptie op de bodemcolloïden worden deze kationen vastgehouden en kunnen de planten ze opnemen door een uitwisseling met H^+ .

Kleirijke bodems kunnen door hun zeer hoge specifieke oppervlakte potentieel veel nutriënten vasthouden. Voor leembodems die typisch 10-24 % klei bevatten, is er ook voldoende sorptiecapaciteit om nutriënten vast te binden voor plantenopname. De sorptiecapaciteit van zandbodems daarentegen is zeer laag, tenzij ze veel organisch materiaal bevatten. Daarom is het heel belangrijk bij zandige bodems om het gehalte aan organisch materiaal te verhogen zodat de bodem meer nutriënten kan vasthouden.

De kleur op de kleicolloïden

De uitlogingshorizont of E-horizont is lichter van kleur. Uit deze horizont is immers het geadsorbeerde ijzer op de kleicolloïden gemigreerd naar de aanrijingshorizont of Bt-horizont. Deze Bt-horizont zal daarom een bruinere kleur krijgen (figuur C1).

De bodemkleur wordt ook beïnvloed door de aanwezigheid van een grote hoeveelheid organische colloïden. Dit zal over het algemeen resulteren in een donkergrijze tot zwarte kleur (figuren C5, C6).



Fig. C5: Een doorsnede van een paalgat uit het vroegneolithicum met aan de basis van het spoor (C6: detailfoto) een klei-humus illuviatie laagje dat bijna zwart is. Deze kleur is kenmerkend voor het klei-humus complex dat aanwezig was in de lössbodem van die periode. Site van Darion, Waremme, provincie Luik, België. (Langohr & Sanders, 1985; Pieters, 1986).

3. Bodemevolutie in Vlaanderen en het proces van minerale- en organische colloïdenmigratie

De belangrijkste bodemmoedermaterialen in Vlaanderen zijn de pleniglaciale en laatglaciale dekzanden en de pleniglaciale löss. Deze eolische sedimenten werden tijdens de laatste ijstijd, het Weichsel, vooral uit het Noordzebekken tijdens perioden met zeer sterke wind, aangevoerd.

De term löss wordt gebruikt om eolische of nievo-eolische leem afgezet tijdens de laatste ijstijd, aan te duiden. Naargelang de korrelgrootte van de deeltjes en de windsnelheid, kunnen ze zich verplaatsen door rollen of kruipen, saltatie of suspensie. Relatief grove bodemdeeltjes zoals grof zand (0,5-1 mm diameter) rollen over het bodemoppervlak. Fijn tot medium zand (0,1-0,5 mm diameter) verplaatst zich door middel van saltatie, een sprongsgewijze voortbeweging relatief dicht bij het bodemoppervlak. Beide fracties verplaatsen zich over een vrij korte afstand vanaf het oorsprongsgebied. Zeer fijn zand (50-100 µm) en lössdeeltjes (2-50µm) verplaatsen zich door suspensie. Hierbij worden de deeltjes over grote afstanden al zwevend meegevoerd door de lucht en kunnen ze veel verder van het oorsprongsgebied afgezet worden

(figuur C7). Zowel de zanden als de löss bevatten ongeveer 10 % kalk op het ogenblik van sedimentatie (Langohr & Marcelino, 2012).

Vanaf het Laatglaciaal werd het klimaat veel vochtiger. Er was een belangrijk neerslagoverschot, enerzijds door veel sneeuw, anderzijds door een relatief lage evapotranspiratie van de ecosystemen (beperkte vegetatie). Hierdoor begon de bodemkalk op te lossen en vanaf het ogenblik dat er geen vrije kalk meer aanwezig was in bodem, verzuurde de bodem. Onder het uitlogingsklimaat van de Bølling en de Allerød, werd de geleidelijke ontkalking gevolgd door kleimigratie. Tijdens de Dryas-periodes werd het klimaat kouder; vooral onder de zeer koude Jonge Dryas ontwikkelde er zich een permafrost, met als gevolg een zeer sterke uitdroging van de bodem. Hierdoor vormde zich een fragipan, een bodem gekenmerkt door een polyonaal barstensysteem met een compacte prismastructuur (zie thema 'Bodemstructuur, druk en compactie' voor meer detail).

Dankzij de ontwikkeling van de typische fragipan horizont doorheen de klei-aanrijingshorizont

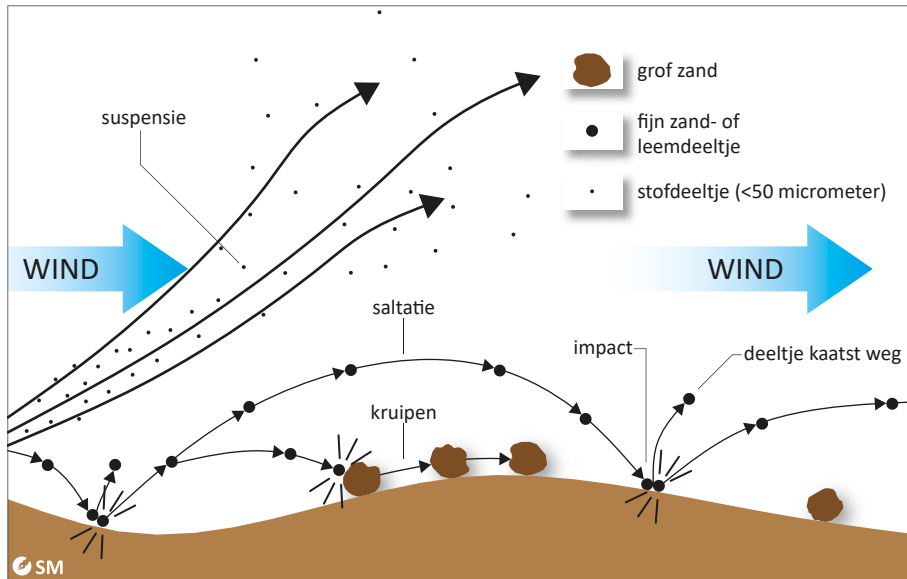


Fig. C7: Transportmechanismen van zand- en leemdeeltjes door de wind. (bron: <https://www.purposegames.com/game/transport-van-zand-door-de-wind>)

(figuren C1, C2, C12), weten we dat tijdens de Jonge Dryas de lössbodems al ontkaalkt waren tot een diepte van 100-120 cm. Deze bodems hadden dus al een periode gekend met een $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ tussen 6,5 en 5,0 in de bovenste meter, met als gevolg de migratie van kleicolloïden. Het proces van kleimigratie leidde tot de ontwikkeling van de uitlogingshorizont van waaruit een deel van de klei was gemigreerd naar de onderliggende horizonten. Op het ogenblik dat de pH in dit deel van de bodem te zuur werd voor verdere colloïdenuitloging, was het oorspronkelijke kleigehalte van ongeveer 15 % in de löss gedaald tot 5–8 %. De klei-uitloging verklaart de lichtere kleur van deze E-horizont (figuren C1, C2, C12, C13). Ook de humusrijke A-horizont heeft klei verloren maar door de donkere kleur van de humus kan men het verlies aan klei visueel niet waarnemen. Dieper in de bodem, meestal tussen 30/40-100 cm ontwikkelde zich een klei-aanrijkingshorizont (Bt) (figuren C1, C2, C8, C9, C13) met ongeveer 20-24 % klei. Met een handlens zijn donkerbruine kleihuidjes op de bodemstructuurvlakken en langs de poriën waar te nemen (figuren C8, C9).

In specifieke milieucondities kan de klei-uitloging en -aanrijking de vorm aannemen van afwisselend lichtere- en bruinere gekleurde 'bandjes' die min of meer parallel aan het bodemoppervlak lopen (figuren C1, C2, C13, C14, C16-C20). Dit kenmerk is voornamelijk zichtbaar in de diepere horizonten, meestal dieper dan 1 m vanaf het maaiveld (zie § 4).

Tijdens het Holoceen ging het ontkaalkingsproces verder. Vandaag bevindt de ontkaalkingsgrens zich in de lössprofielen op een diepte van 2,5 tot 3,5 m, in functie van de regenneerslag en de reliëfpositie (figuren C2, C19, C20). Onder bos, zonder menselijke tussenkomst, zijn de bodems nu zeer zuur geworden met een $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ tussen 3,7 en 4,0 tot meer dan 1 m diepte. Dit heeft tot gevolg dat de colloïden hier niet meer mobiel zijn en dat de kleihuidjes in feite indicatoren zijn van vroegere milieucondities (figuren C10, C11). In de diepere horizonten daarentegen, in een zone tot enkele decimeters boven de ontkaalkingsgrens, ligt de pH vandaag nog steeds tussen 5,0 en 6,5. Kleimigratie is op deze diepte nog steeds een actief proces, waarbij eluvatie- en aanrijkingbanden, E/Bt-banden, gevormd worden (figuren C1, C2, C13, C14).

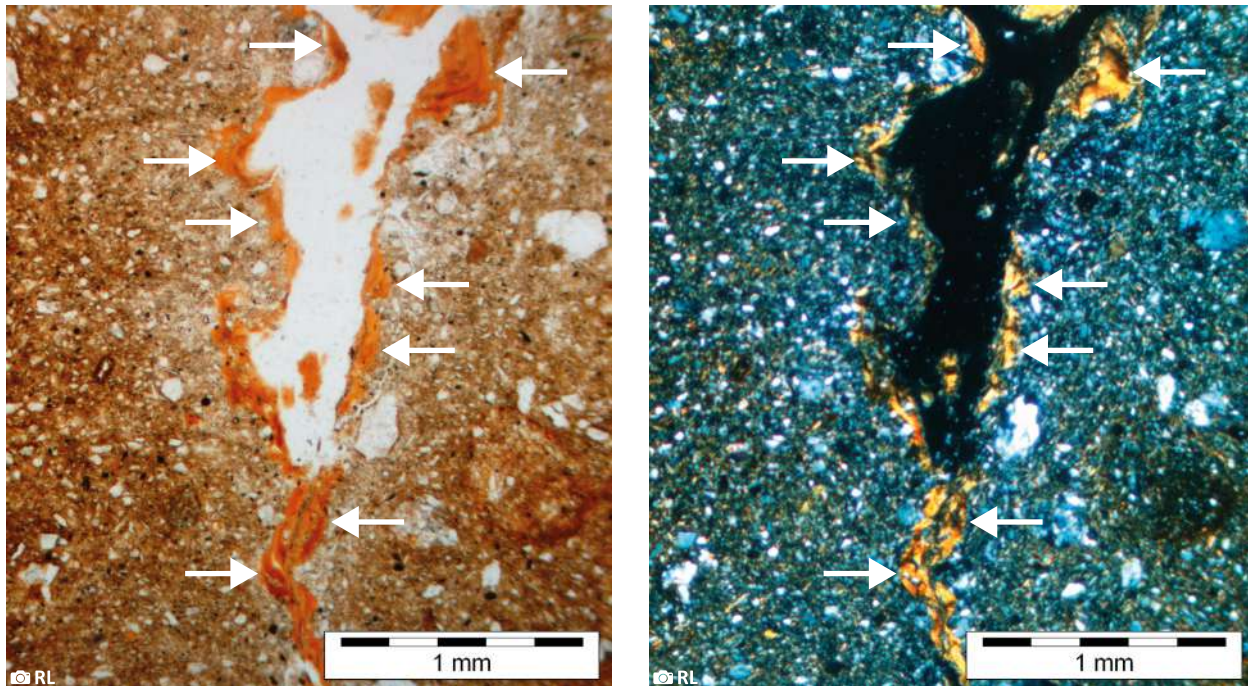


Fig. C8-C9: Detail bodemfoto onder de microscoop. Op figuur C8 is onder gewoon licht klei-aanrijking op de wanden van een galerij te zien als een felle roestbruine rand. Op figuur C9 is dezelfde detailfoto te zien, maar dit keer onder gepolariseerd licht. De klei-aanrijking heeft een intens gekleurde gele rand. De kleihuidjes zijn met het bodemwater afgezet op de wanden van de galerij. Telkens wordt een microscopisch dun laag afgezet. Omdat kleimineralen een plaatstructuur hebben, worden ze als het ware als een stapel papier, met dezelfde oriëntatie afgezet. De kleimineralen afgezet in de galerij met min of meer dezelfde oriëntatie, zijn sterk dubbelbrekend onder gepolariseerd licht. De kleimineralen die oorspronkelijk aanwezig waren in de bodem, zullen niet op dezelfde manier oplichten. Op deze manier kan men kleimigratie, een bodemproces, onderscheiden van de oorspronkelijk aanwezige klei (primaire afzetting) of van klei die door de mens in of op de bodem werd aangebracht.

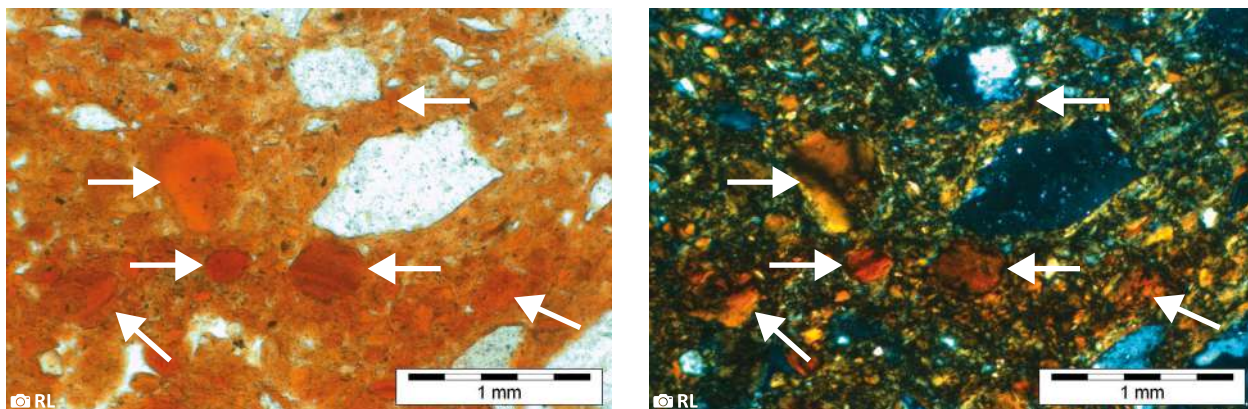


Fig. C10-C11: Twee foto's van klei-aanrijking in de bodem onder de microscoop. Zichtbaar zijn de gefragmenteerde kleihuidjes als orangerode zones (fig. C10; PPL of gepolariseerd licht) of als oranjegele zones (fig. C11; XPL of gekruist gepolariseerd licht). De fragmentatie van de kleihuidjes wijst op een verstoring van de originele bodem, bijvoorbeeld door bioturbatie of door vries/dooi. Dit toont het belang van bodemmicromorfologische observaties.

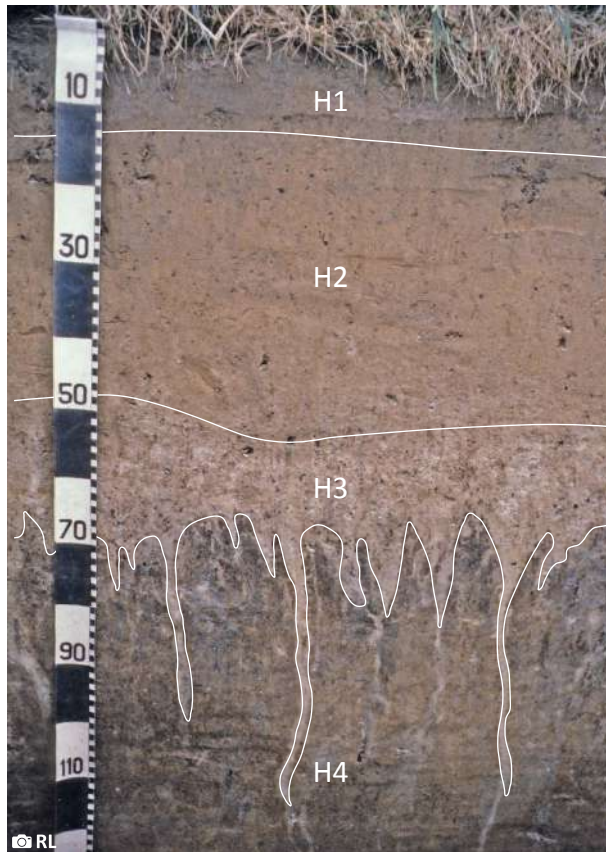


Fig. C12: Leemstreek. Een bodem uit het vroegneolithicum begraven onder ongeveer 50 cm colluvium (H1+H2). De oorspronkelijke bodems uit die periode bezitten doorgaans een donkerbruine tot zwarte klei-illuvatiehorizont (H4) (zichtbaar tussen ongeveer 65-80 cm) door de aanwezigheid van een klei-humus complex. In het bovenste deel van de oorspronkelijke bodem (H3) (55-65 cm) is de humus verteerd door microbiologische activiteit. Site van Darion, Waremmе, provincie Luik, België. (Langohr & Sanders, 1985; Pieters, 1986).

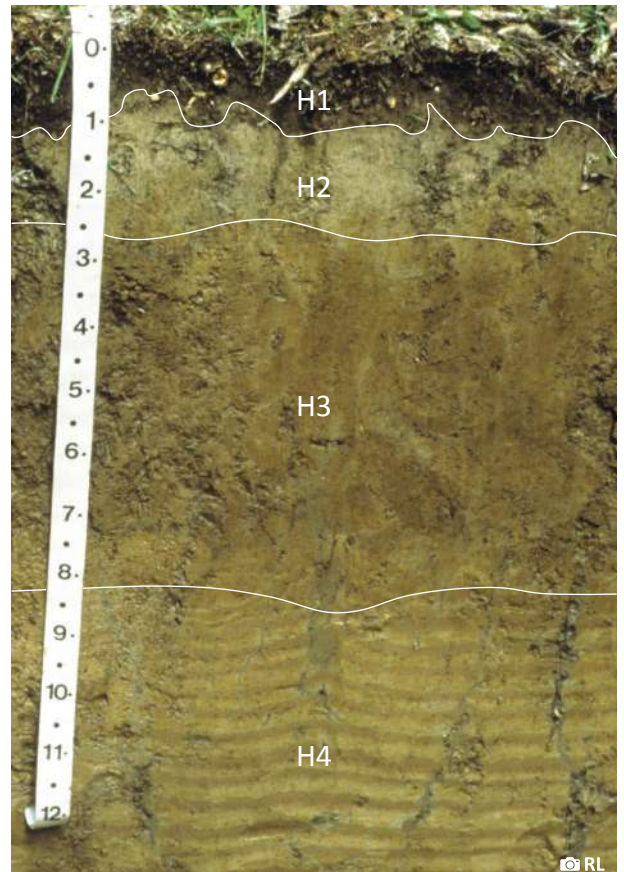


Fig. C13-C14: Kleimigratie in bodems met weinig of geen menselijke invloed. Een bodem ontwikkeld in löss, hoogst waarschijnlijk nooit bewerkt. Onder een dunne humusrijke zwarte A-horizont (H1: 0-10 cm) ligt een bleke klei-uitlogingshorizont (E) (H2: 10-25 cm) met eronder een goed ontwikkelde donkerbruine klei-aanrijkingshorizont (Bt) (H3: 25-85 cm). Tot 85 cm diepte zijn deze horizonten onderhevig aan een matige bioturbatie door planten en dieren en sterke vocht/droog cycli. Vanaf 85 cm is er een opeenvolging van duidelijke uitloging en aanrijking van klei in banden, een (E/Bt)-horizont (H4: 85-130 cm). Fig. C14: detailfoto: De illuvatiebanden hebben over het algemeen een scherpe bovengrens en een minder duidelijke ondergrens. Regio ten zuiden van Moskou, Rusland.

Kleimigratie op een niet-archeologische site - Roborst leemgroeve, Munkzwalm, provincie Oost-Vlaanderen, België (figuren C15-C20) (Ampe & Langohr, 2006)



Fig. C15: Ontginning van Brabantiaanlöss.

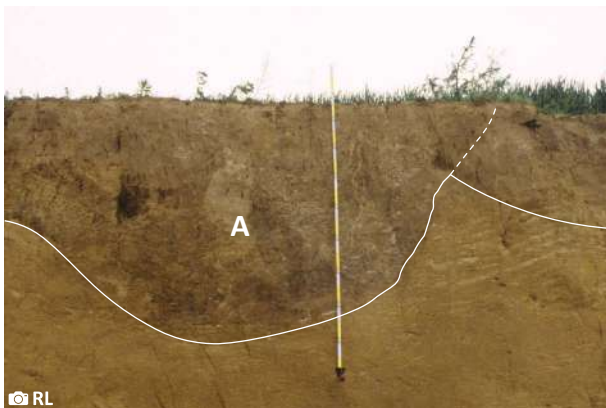


Fig. C16: Zeer oud spoor van een ontwortelde boom (A). Het profiel is ongeveer 40 cm geërodeerd en de 30 cm dikke ploeglaag is verwijderd. Dit betekent dat deze structuur tot ongeveer 2,4 m onder het oorspronkelijke maaiveld ging. De boom is naar rechts gevallen.

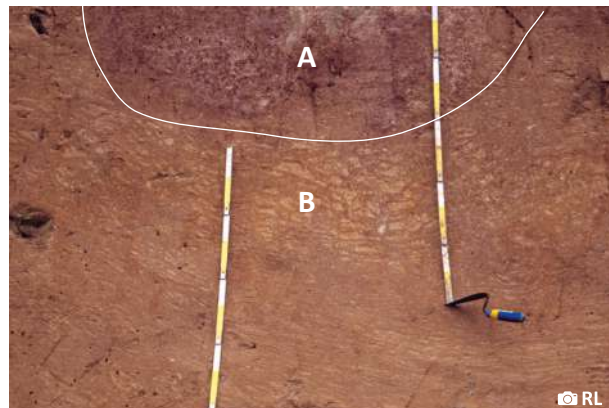


Fig. C17: De kleimigratiebanden (B) volgen de onderkant van de structuur van de ontwortelde boom (A). Dit toont aan dat het om een zeer oude structuur gaat (meerdere duizenden jaren).



Fig. C18: Detail van de kleimigratiebanden: de donker gekleurde banden zijn banden van klei-aanrijking (zwarte pijlen), de bleker gekleurde banden van klei-uitloging (witte pijlen).

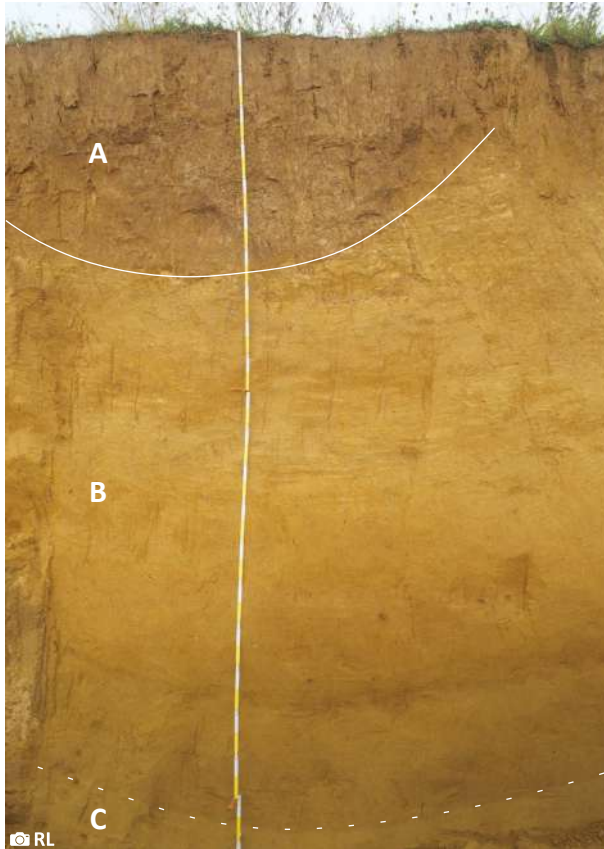


Fig. C19: De zeer scherpe ont kalkingsgrens (grens B-C) op 4 m diepte loopt evenwijdig aan de ondergrens van de structuur van de ont wortelde boom (A). Het ont kalkingsproces (in de diepte) is vandaag niet meer actief, omdat de akker bekalkt wordt (aan de oppervlakte van de bodem) en de pH te hoog is om de klei te kunnen dispergeren.

4. Klei- en organische colloïdenmigratie in banden

De dispersie, migratie en accumulatie van colloïden in de vorm van dunne bandjes of '*lamellae*' gaande van enkele mm tot enkele cm dik (IUSS Working Group, 2014), is een veel voorkomende bodemontwikkeling. Hoewel deze morfologie frequent aanwezig is in lössbodems (Ampe & Langohr, 2006: 146), werd dit bijna nooit vermeld in de documenten van de Belgische Bodemkaart. De hoofdreden hiervoor is dat tijdens de bodemkartering de meeste bodemobservaties tot maximaal 120 cm diep reikten en dat de kleimigratielamellae doorgaans dieper in het profiel zitten.

Soms zijn de E/Bt-bandens ('*limons à doublets*') in lössbodems ten onrechte beschreven als stratificatie, wat een geologisch proces is. Hieronder volgen de voornaamste argumenten die aantonen waarom de E/Bt-bandens van bodemgenetische oorsprong zijn:

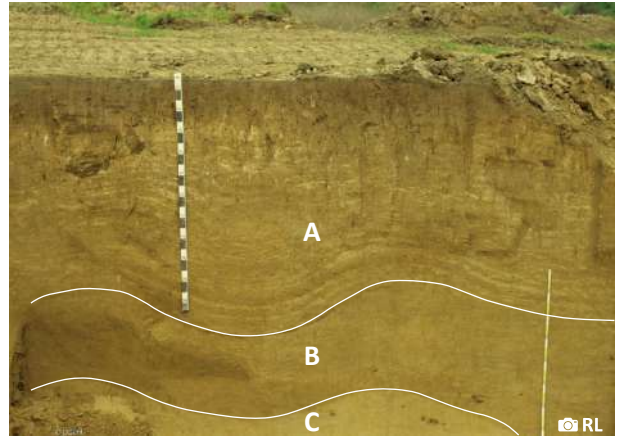


Fig. C20: De bodem is ongeveer 70 cm geërodeerd en afgegraven. Het golvend verloop van de kleimigratiebanden (A) en de ont kalkingsgrens op 360 cm diepte (B-C) vanaf het origineel bodemoppervlak zijn te wijten aan een reeks windworpstructuren. De kleimigratiebanden en de ont kalkingsgrens volgen de grens van de lokale depressie gevormd door de boomworp. Dit bewijst dat het hier om een zeer oude ont wortelde boom gaat (meerdere duizenden jaren).

- de bruine banden hebben een hoger klei- en ijzergehalte dan de lichter gekleurde (= klei-aanrijking);
- de bruine banden tonen in slijpplaatjes kenmerken van klei-illuvatie en soms van accumulatie van klei- en organische colloïden. Doordat de klei met het bodemwater getransporteerd is, wordt de klei georiënteerd. Onder de microscoop kan men dit gepolariseerd licht zien (figuren C8, C9);
- de banden worden enkel geobserveerd in de ont kalkte bodem;
- waar de ont kalkingsgrens een golvend verloop vertoont, volgen de migratiebanden deze topografie (figuren C15-C20);
- de banden volgen meestal de algemene bodemhelling (figuren C23, C24);

- juist boven de ont kalkingsgrens komt er typisch een horizont voor van ongeveer 10-25 cm dikte waar de banden ontbreken. De $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ van deze horizont bevindt zich tussen 6,5-7,0 wat wijst op een hoge graad van verzadiging aan Ca^{2+} -kationen zodat de colloïden hier niet verder kunnen migreren (figuren C2, C19, C20);
- er is een goede overeenkomst tussen de dikte van de opeenvolgende bruinere en blekere banden (figuren C1, C14);
- over het algemeen is de bovengrens van de banden scherper dan de ondergrens (figuren C14, C26, C27);
- lokaal kunnen de banden variëren in oriëntatie wat moeilijk kan verklaard worden aan de hand van sedimentatieprocessen (figuren C3, C4, C16-C20, C25, C29, C30);
- lokaal kunnen E/Bt-banden doorheen een *crotovina* (opge vulde biogalerij) lopen wat betekent dat dit geen geologische stratificatie kan zijn (figuur C31).

In de literatuur worden kleimigratiebanden en *lamellae* wel vermeld, vooral voor meer zandige bodems (bijvoorbeeld Coen & Pawluk, 1966; Schaetzel, 1992). Deze kleibandjes en *lamellae* kunnen slechts bewaard blijven in bodemhorizonten die weinig verstoord worden door bioturbatie of door cycli van vries/dooi, zwellen/krimpen of vochtig/droog (structuurvorming). Vandaar dat we, in bodems die reeds een ontwikkeling kennen over een periode van 10.000 à 15.000 jaar, deze migratiebanden slechts op grotere diepte kunnen waarnemen (figuren C1, C2). **In archeologische structuren** daarentegen die jonger zijn, kan deze accumulatievorm in België minder diep voorkomen (figuren C29-C31, C34-C36). Ook elders wordt er op archeologische sites verwezen naar dit kenmerk (bijvoorbeeld Prusinkiewicz *et al.*, 1994; Lenka *et al.*, 2019).

Stratificatie versus colloïdenaanrijking in een archeologische structuur (figuren C21-C22)

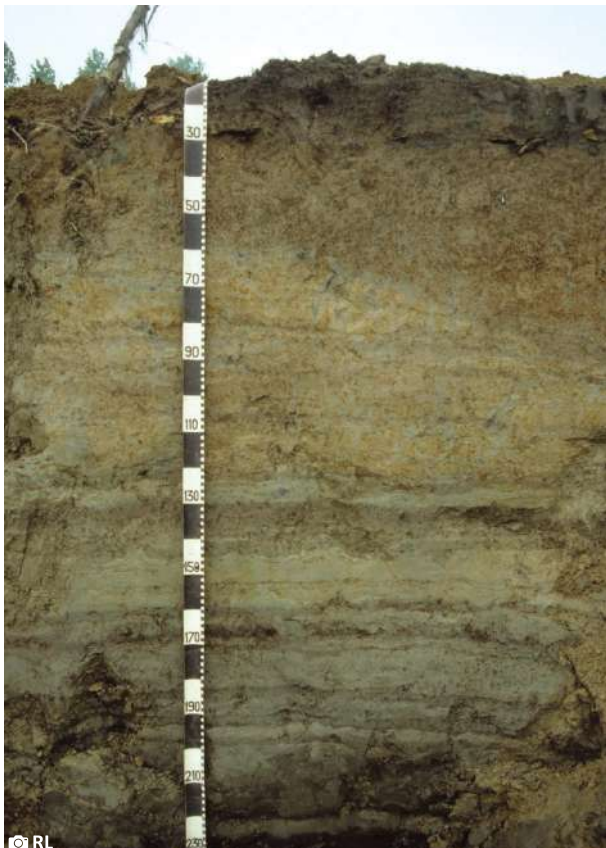


Fig. C21: Een bodem ontwikkeld in gestratificeerd alluvium. Site van Darion, Waremme, provincie Luik, België.

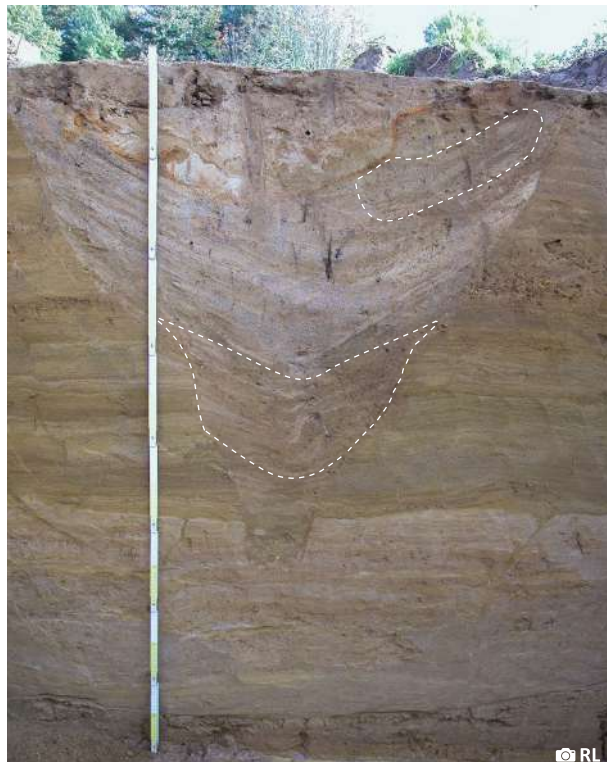


Fig. C22: Een gracht gegraven in gestratificeerd alluvium. In de grachtvulling bevinden zich twee zones met kleimigratiebanden (tussen streepjeslijnen). Zandleemstreek, site van Edgem-Buizegem, provincie Antwerpen, België. (Vandeveld & Annaert, 2006; Vandeveld *et al.*, 2006; Langohr, 2007).

Colloïdenmigratie in archeologische structuren: de klei-aanrijdingsbanden lopen parallel aan het oppervlak, volgen de algemene bodemhelling en hebben een golvend verloop - de motte van Werken. Kortemark, provincie West-Vlaanderen, België (figuren C23-C25) (Langohr, 1991; Gebhardt & Langohr, 1999)



◀ Fig. C23: Aanrijdingsbanden van klei en humus die min of meer parallel aan het oppervlak lopen. In een laatste fase werd de motte gebruikt als akker. Dit verklaart wellicht de migratie van zowel klei- als humuscolloïden.

▼ Fig. C24: Detailfoto. De colloïdenmigratiebanden, het resultaat van bodemgenese, doorkruisen de diverse ophopingslagen (zwarte pijlen).

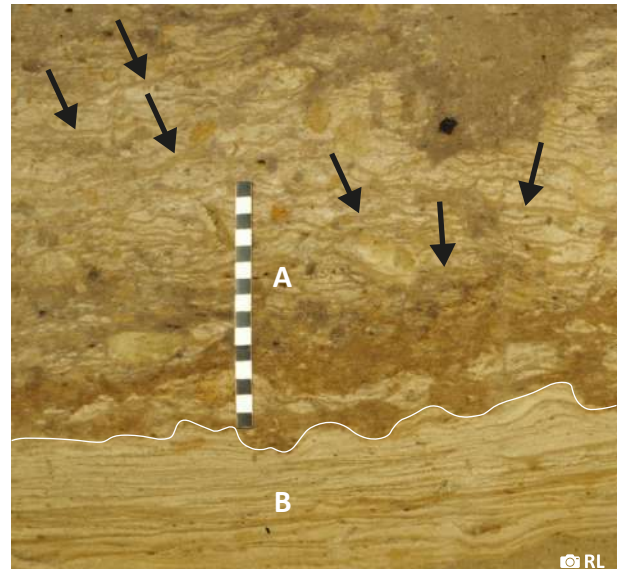


Fig. C25: Verschil tussen de golvende aanrijdingsbandjes van colloïden (A: zwarte pijlen) en de regelmatige sedimentstratificatie (B).

Voorbeelden van de begrenzing van illuviatiebanden (figuren C26-C27)



Fig. C26: Kenmerkend voor het eluvatie/illuviatie proces is de zeer scherpe bovengrens van de aanrijdingsbanden (witte pijlen) en de iets onregelmatigere ondergrens (rode pijlen). De illuviatiebanden doorkruisen de andere bodemfragmenten (geelbruine kleur) van de vulling, een bewijs dat de banden jonger zijn dan de vulling. De kleiband is dus het resultaat van bodemgenese en niet van stratificatie in de sedimentvulling. Viereckschanze, Kontich, provincie Antwerpen, België.

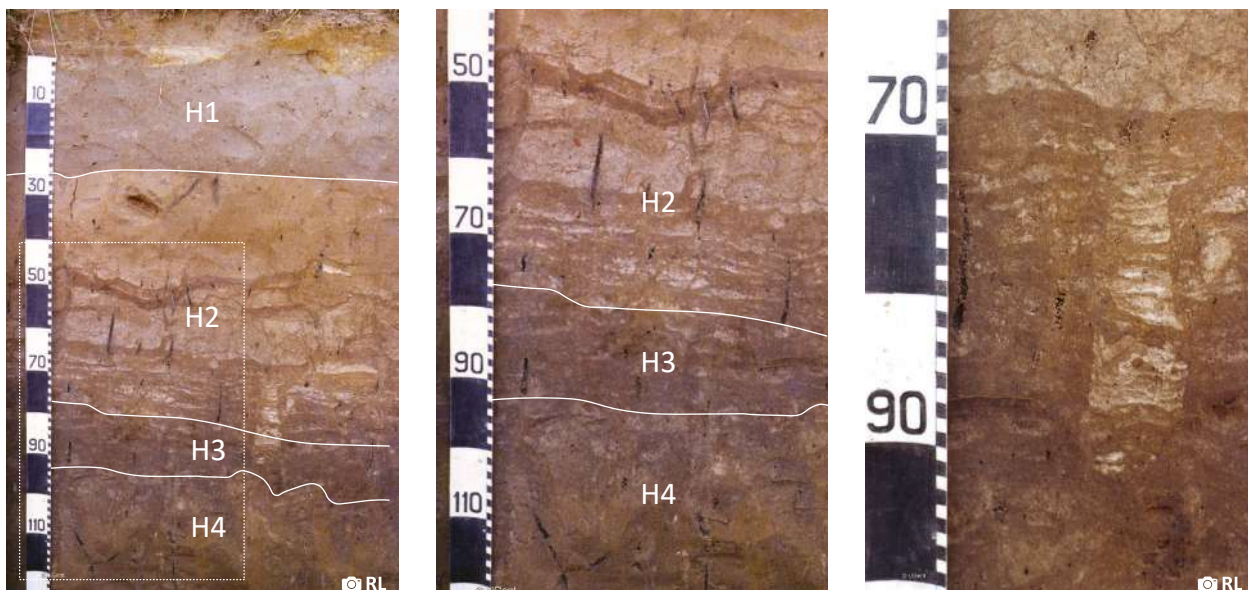


Fig. C27: Detail van de klei-humus accumulatie onder de vorm van *lamellae* en banden met een zeer scherpe bovengrens en minder scherpe ondergrens. Kerkhove, provincie West-Vlaanderen, België.

Colloïdenmigratie in archeologische structuren bijvoorbeeld in antropogeen colluvium - Romeinse site van Kerkhove - Kouter, provincie West-Vlaanderen, België (figuren C28-C31) (bijvoorbeeld Rogge & Van Doorselaer, 1982; Omar, 1985; De Cock *et al.*, 1996)



Fig. C28: Romeinse site van Kerkhove - Kouter.



H1: 0-25 cm: Ap; huidige ploeglaag.

H2: 25-80 cm: E/Bt; antropogeen colluvium met duidelijke klei-humus aanrijks/*lamellae* en-banden.

H3: 80-95/105 cm: Ab; donkergrijze begraven humusrijke oppervlaktehorizont.

H4: 95/105-130+ cm: Btb; begraven klei-aanrijks-horizont.

Fig. C29: Voorbeeld van klei-uitlogings- en aanrijksbanden. In bodems met een licht zandleem textuur. (Profiel 3, Omar, 1985).

Fig. C30: Detailfoto.

Fig. C31: De migratiebanden doorkruisen de vulling van een oude mollengang.

Colloïdenmigratie in archeologische structuren bijvoorbeeld in een *tumulus* - tomme van Ottenburg, middenneolithicum. Huldenberg, provincie Vlaams-Brabant, België (figuren C32 - C36).

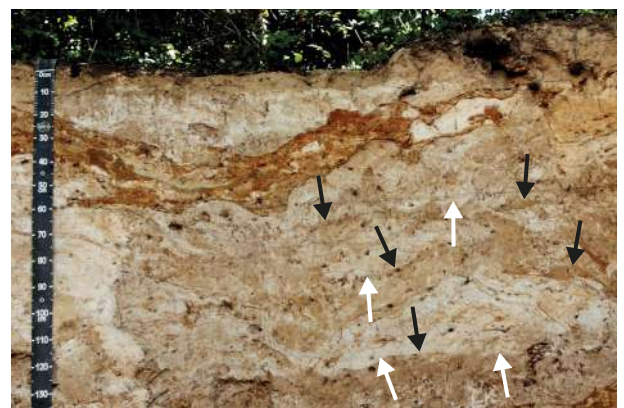
De kleimigratiebanden lopen doorheen de structuren. Dit bewijst dat de migratiebanden dateren van na het aanleggen van de archeologische structuren (Vanmontfort, 2013)



Fig. C32-C33: Tomme van Ottenburg.



Fig. C34-C36: De witte en lichter gekleurde lagen en brokken (witte pijlen/gestippelde lijn) zijn klei-uitlogingshorizonten, geassocieerd met illuviatiebanden (zwarte pijlen). De pijlen wijzen slechts naar de grootste van deze elementen die soms onregelmatig van vorm zijn (fig. C35). Dit is te wijten aan een onregelmatige waterpercolatie door de structuur. Deze sterke migratie wijst erop dat de aangebrachte aarde, kalkrijke leem bevatte uit een diepe groeve (dieper dan 2,5 m) anders kon het kleimigratieproces niet meer gereactiveerd worden.



5. Tussenkomst van de mens

Zoals reeds eerder uitgelegd kunnen klei- en organische colloïden in bepaalde milieucondities dispergeren en migreren en uiteindelijk flocculeren (neerslaan) op plaatsen waar de milieucondities hiervoor gunstig zijn (zie §2). Deze neerslag heeft vooral plaats op structuuroppervlakken en langs poriën, maar komt ook voor in aanrijdingsbandjes (zie §4). Het geheel van deze processen kan ook in **archeologische structuren** plaatsvinden zoals in *tumuli* met als voorbeelden de *tumulus* van Glimes (figuren C37-C44) en de tomme van Ottenburg (figuren C32-C36), in mottes met als voorbeeld de motte van Werken (figuren C23-C25), vullingen van grachten (*Viereckschanze*, Kontich- figuren C26, C45-C48, C52, C53), kuilen (figuren C9, C10, C12, C49-C51, C56-C60) en silo's (figuur C54). Dit wijst erop dat op een zeker ogenblik de zuurtegraad (pHH₂O) van de bodem tussen 5,0 en 6,5 lag.

Een voorbeeld is de *tumulus* van Glimes, een Gallo-Romeinse grafheuvel vermoedelijk uit de 2de eeuw n. Chr. Bij de aanleg van de *tumulus* was de oorspronkelijke bodem al te zuur zodat er geen kleimigratie kon optreden. Voor de constructie van de *tumulus* werd er echter kalkhoudende aarde aangevoerd, waardoor het proces van kleimigratie opnieuw kon beginnen. Dit leidde in de eerste plaats tot uitloging van de kalk. Wanneer de bodem een pHH₂O tussen 6,5 en 5,0 bereikte, werd het proces van kleimigratie gereactiveerd. In de Belgische leemstreek was het nodig om groeves voldoende diep te graven om de kalkhoudende leem te vinden (diepte van meer dan 2-3 m).

In België, waar bijna alle bodems zuur waren vóór de eerste landbouw, toont de aanwezigheid van kleimigratiebanden aan dat er op een zeker ogenblik kalk op de bodem is aangebracht. Volgens Dudal (1999) gebeurde dit reeds vanaf de ijzertijd waardoor er een periode was waarbij de colloïden opnieuw mobiel werden. Niet alleen de klei werd mobiel, maar door de bodembewerking werden ook de organische colloïden verplaatst zodat de aanrijkingshuidjes hier een grijzere kleur hebben. Dit weerspiegelt zich ook in de micromorfologische bodemstudie. De aanrijkingshuidjes waren oorspronkelijk redelijk gelijkvormig, helder en oranje-rood gekleurd (figuren C2-C5). De huidjes van akkers zijn meer gespikkeld en minder fel gekleurd door de vermenging met organische colloïden (figuren C23-C31, C45-C48). Soms bestaat er een chronologische gelaagdheid,

met eerst heldere kleihuidjes en vervolgens gespikkelde accumulaties. Dit wijst op een overgang van bos naar akker. Deze colloïdenmigratie is dikwijls te zien in **grachten, kuilen, silo's en mottes** die ooit beakkerd zijn geweest of die nog steeds onder akkerland met bekalking liggen.

Een opvallend kenmerk van kleimigratie in archeologische structuren is de ontwikkeling van een **uitgesproken witte uitlogingshorizont** onder de vorm van banden (figuren C22, C32-44, 50-54). Dit wijst op een langdurige migratie waarbij alle klei (met geadsorbeerd ijzer) uitgeloozd is. In de originele leembodems is de uitlogingshorizont lichtbeige (figuren C1, C6) door de aanwezigheid van nog zo'n 6-8 % klei, maar deze bodems werden al vlug te zuur, waardoor de migratie vroeg stopte. De sterke uitloging in talrijke archeologische structuren daarentegen is te wijten aan een langdurige dispersietoestand door een onafgebroken bekalking van de oppervlaktehorizont (ploeglaag). Hierdoor behoudt de bodem een pH_{H₂O} tussen 5,0 en 6,5 (zie § 2). Een andere situatie is de aanwezigheid van kalkrijk sediment hoger in het profiel. Dit komt bijvoorbeeld voor in *tumuli* waarvan de leem afkomstig was uit groeven die het diepe kalkrijke sediment bereiken. Deze sterke kleimigratie met een uitgesproken witte uitlogingshorizont en de vorming van dikke kleihuidjes in de poriën in archeologische structuren werden ook geobserveerd door Slager & van de Wetering (1977). Zij legden een verband met de destabilisatie van houtskool door de aanwezigheid van as die veel kalium bevat. Kalium is net zoals natrium een ion dat klei sterk doet dispergeren (zie §2) zodat het uitlogingsproces langer kan doorgaan.

Colloïdenmigratie in archeologische structuren bijvoorbeeld in een *tumulus* - de *tumulus* van Glimes, Romeinse periode. Leemstreek, provincie Waals-Brabant, België (figuren C37-C44) (Massart *et al.*, 2003; Langohr, 2009)



Fig. C37-C38: *Tumulus* van Glimes.

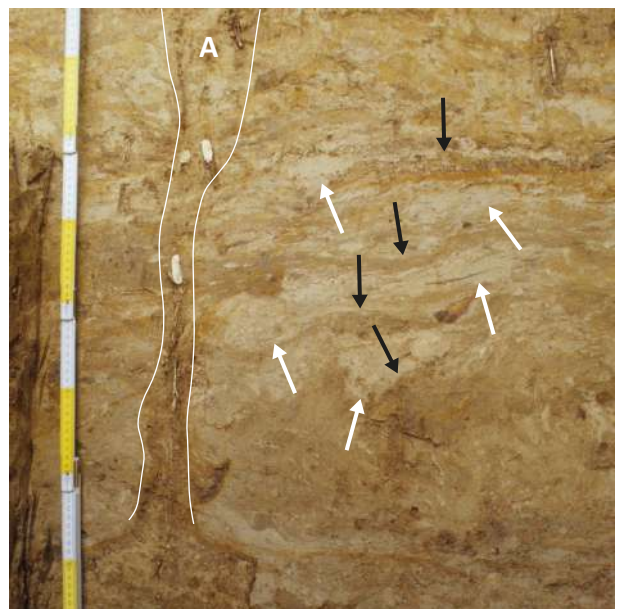


Fig. C39-C40: Een belangrijk volume van de bodem bestaat uit onregelmatige min of meer horizontale witte leemlagen (fig. C40: witte pijlen). Dit is geen witte aarde die aangebracht is, het zijn bodemgenetische klei-uitlogingshorizonten geassocieerd met bruinrijze klei-illuvatie horizonten (fig. C40: zwarte pijlen). Enkel de grootste elementen zijn aangeduid. Een verticale rijpingsbarst (fig. C40: A), die wortels gebruiken om diep in de bodem te kunnen dringen, doorkruist de banden. De rand van de barst is bedekt met een ijzer-mangaan accumulatie, veroorzaakt door periodische waterverzadiging.



Fig. C41: Klei-uitlogings- en aanrijksbanden op een horizontaal vlak.

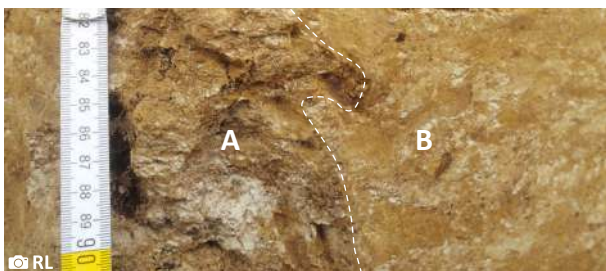


Fig. C42: De witte spikkels op het glad oppervlak (B) zijn klei-uitlogingsvlekken op structuurvlakken en langs poriën; ze zijn echter beter zichtbaar op een gebroken oppervlak (A).

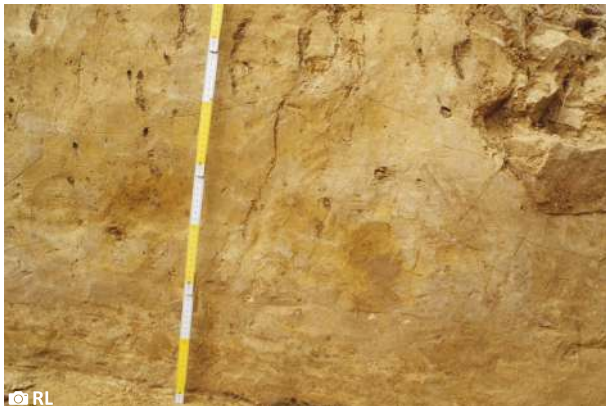


Fig. C43: De geelbeige brokken grond, soms geassocieerd met een humeuze vlek, zijn fragmenten van de Kesselt-bodem of de Nagelbeek horizont die gevormd is op de grens van de Brabantiaan löss en de onderliggende Hesbayaan löss. Deze grens ligt normaal meters diep, meestal in de nog kalkrijke löss. Dit toont aan dat de grond gebruikt voor de *tumulus* afkomstig is uit een diepe groeve.



Fig. C44: Opbouw van de *tumulus*: een opeenvolging (hier een 7-tal) van enkele dm dikke, horizontale lagen die telkens werden samengedrukt. Dit verzekerde de stabiliteit van de heuvel.

Colloïdenmigratie in archeologische structuren in een grachtvulling - *Viereckschanze*, late ijzertijd (laat-La Tène) op de Alfsberg, Kontich, provincie Antwerpen, België (figuren C45-C48) (Annaert *et al.*, 1993; Fechner & Langohr, 1993)



Fig. C45: Een 4,5-5,0 m diepe gracht van een *Viereckschanze* of een vierhoekig openluchtheiligdom, bestaande uit een vierhoekige gracht met walstructuur.

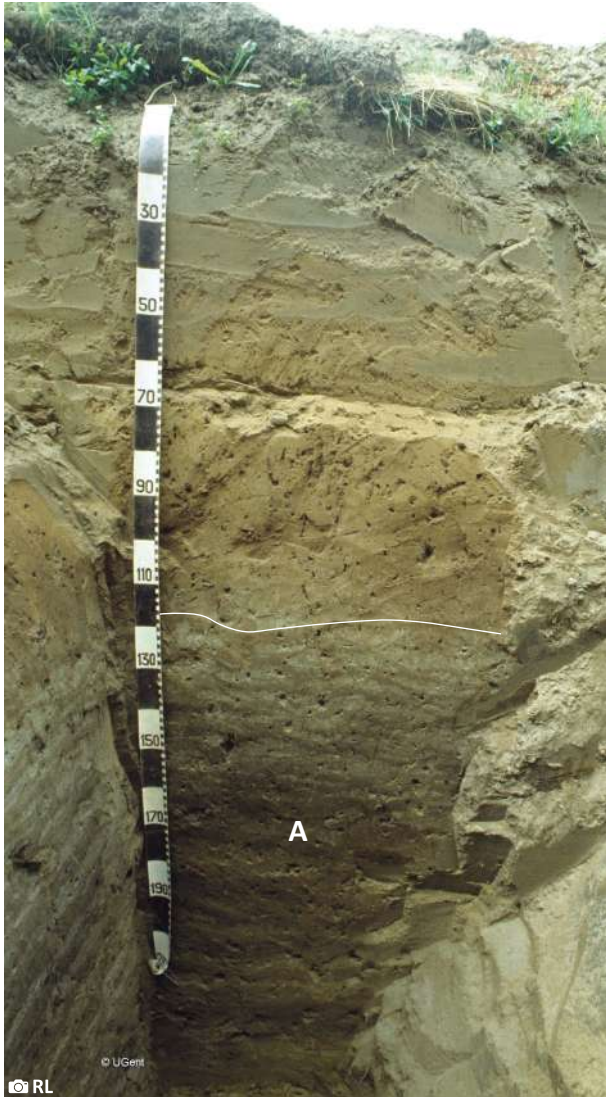


Fig. C46-C47: Tussen 120 en 250 cm diepte (A) vertoont de zandige humusrijke grachtvulling, die zo'n 2000 jaar oud is, een 'pseudostratificatie' die in feite kleimigratiebanden zijn.



Fig. C48: De lichter gekleurde strata zijn uitlogingsbanden van klei- en organische colloïden. De donker gekleurde strata zijn illuvatiebanden van deze elementen. De grijze kleur van de banden wijst op accumulatie van organische colloïden. Dit migratieproces in een sediment dat origineel zuur was, wijst erop dat men op een zeker ogenblik de bodem heeft bekalkt, waarschijnlijk voor een betere groei van landbouwgewassen (zie ook fig. C26).



Colloïdenmigratie in archeologische structuren in de vulling van kuilen, silo's, grachten (figuren C49-C57)

Fig. C49: Kleimigratiebanden in de vulling van een grote kuil. Leemstreek, Velzeke, Zottegem, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. C50-C51: De lichte kleur tussen 100 en 140 cm is klei-eluvatie met daaronder, ter hoogte van de kuil, klei-illuvatie. Zandleemstreek, Edegem-Buizegem, provincie Antwerpen, België. (Vandeveld *et al.*, 2006).



Fig. C52-C53: Klei-illuvatiebanden (zwarte pijlen) onder de grachtstructuren. Zandleemstreek, Kortemark, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. C54: Vulling van een silo. De lichtere kleur is te wijten aan kleimigratie doorheen heel de vulling. Leemstreek, Dourges, departement Pas-de-Calais, Frankrijk. (Fechner *et al.*, 2004).

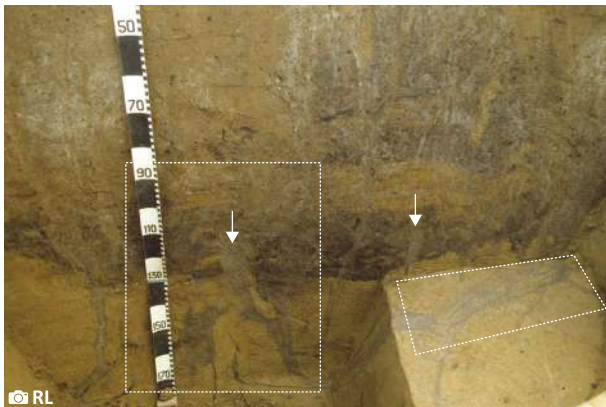
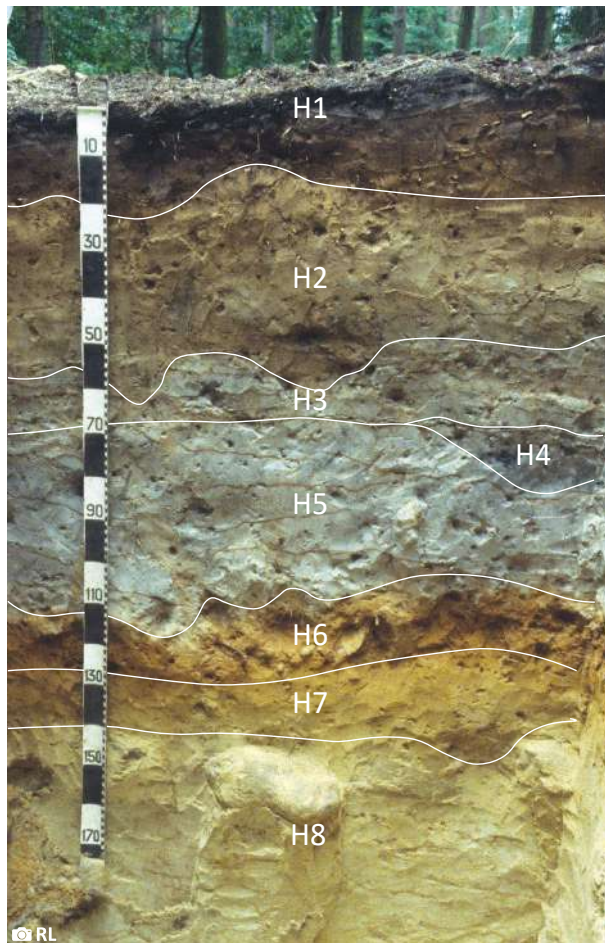


Fig. C55-C57: Een kuil uit het neolithicum. Op de bodem van de kuil bevindt zich een zwarte klei-humusilluviatie die doorkruist wordt door een min of meer verticaal barstenpatroon (pijlen) gevuld met lichter grijze klei-humus illuviatie. Leemstreek, site van Blicquy, Leuze-en-Hainaut, provincie Henegouwen, België. (Mikkelsen & Langohr, 1996).

Colloïdenmigratie in archeologische structuren onder een wal van leem - Hallstattfortificatie in het Hal-lerbos. Braine-le-Château, provincie Waals-Brabant, België (figuren C58-C60)



- H1+H2: de wal bestaat uit leemig sediment.
 - H1: 0/+15-12/23 cm: ^Ah; humusrijke oppervlaktehorizont.
 - H2: 12/23-47/64 cm: ^Bw; kleur B-horizont.
 H3: 47/64-65/70 cm: Ab; restanten van de humeuze oppervlaktehorizont van de begraven ijzerpodzol.
 H4: 67/71-67/84 cm: Ab; resten van de humeuze oppervlaktehorizont van de begraven ijzerpodzol.
 H5: 67/84-103/118 cm: Eb; ijzeruitlogingshorizont van de podzol; enkele fijne klei-aanrijkingslamellae (Bt) afkomstig van de aarden wal.
 H6: 103/118-121/130 cm: Bsb1; maximale ijzeraanrijkingshorizont van de ijzerpodzol, ook 'bospodzol' genoemd.
 H7: 121/130-139/150 cm: Bsb2; overgangshorizont.
 H8: 139/150-175 cm: Cb; tertiair zand met enkele silicium-zandstenen, het moedermateriaal van de podzol, enkele fijne klei-aanrijkingslamellae (E/Bt).

Fig. C58: Volledig bodemprofiel met een ijzerpodzol ter hoogte van de aarden wal. De horizonsymbolen zijn uitgelegd in Mikelsen *et al.*, 2022. (Fourny & Van Assche, 1988).

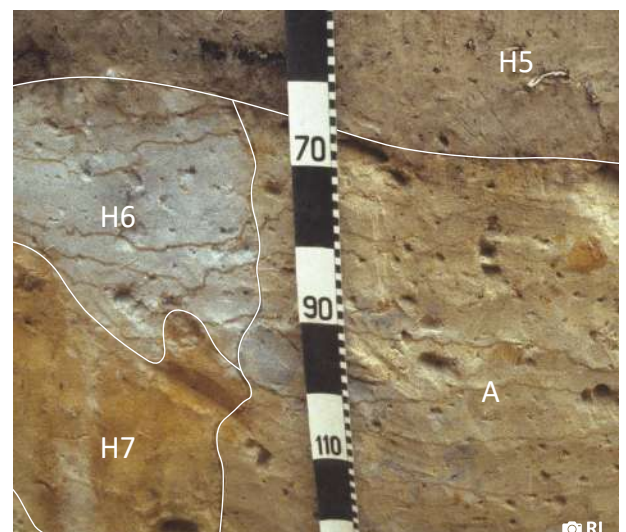
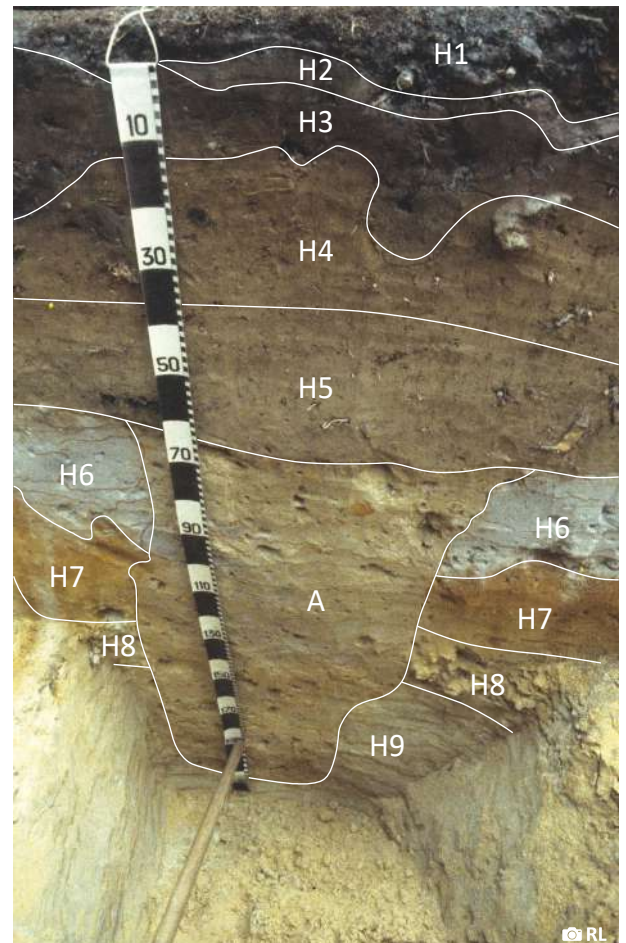


Fig. C59-C60: Spoor van een paalgat (A) gevuld met leemig zand. De klei-aanrijkingslamellae, duidelijk zichtbaar in de witte ijzeruitlogingshorizont van de ijzerpodzol (H6), lopen door de vulling (A). (H2: E; H3: Bh; H4: B(h); H5: B; H6: Eb; H7: Bsb; H8: Bb; H9: C).

REFERENTIES

- Ampe, C. & Langohr, R., 2006. Roborst - Steenbakkerij. Uitgewerkt voorbeeld erkenningsdossier Waardevolle Site voor Bodem. In: Project waardevolle bodems in Vlaanderen. Eindverslag. Ampe, C., Bosmans, E., Defrijn, S., Vancampenhout, K. & Wouters, K., 139-148. Vlaamse Overheid, Dienst Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen, 208 pp.
- Annaert, R., Cooremans, B., Eryvynck, A., Demiddele, H., Fechner, K. & Langohr, R., 1993. Een *Viereckschanze* op de Alfsberg te Kontich (provincie Antwerpen): meer dan een cultusplaats. *Archeologie in Vlaanderen*, III, 53-125.
- Brady, N. & Weil, R., 2008. *The Nature and Properties of Soils*. 14th ed., Pearson Prentice Hall, 975 pp.
- Cahen, D., Keeley, L., Cornelissen, E., Deramaix, I., Gratia, H., Trocki, P. & Jadin, I., 1989. Découvertes récentes aux limites occidentales du rubané de Hesbaye. *Notae Praehistoricae*, 9, 73-78.
- Coen, G., Pawluk, S. & Odynski, W., 1966. The origin of bands in sandy soils of the stony plain area. *Canadian Journal of Soil Science*, 46, 245-254.
- De Cock, S., Heim, J., Huysmans, L., Van Maercke-Gottigny, M.-C., Rogge, M. & Vynckier, J., 1996. Multidisciplinaire onderzoeksresultaten van de Gallo-Romeinse baanpost te Kerkhove (Gem. Avelgem). *West-Vlaamse Archaeologie*, 12, 33-73.
- Dudal R., 1999. Déjà au temps des Ménapiens. *Pedologie – Info*, 20, 5.
- Fechner, K. & Langohr, R., 1993. Bodemkundige gegevens en interpretatie. In: *Een Viereckschanze op de Alfsberg te Kontich (provincie Antwerpen): meer dan een cultusplaats* (Ed. Annaert, R.), 85-90. *Archeologie in Vlaanderen*, III.
- Fechner, K., Blancquaert, G. & Langohr, R., 2004. L'utilité de l'archéopédologie: l'exemple du site du Marais de Dourges (Pas-de-Calais). *Archéopages*, 12, 10-13.
- Fourny, M. & Van Assche, M., 1988. Nouvelle fortification Hallstattienne dans le Bois de Hal. XLIX^e Congrès de la Fédération des Cercles d'Archéologie et d'Histoire de Belgique. Congrès de Namur, 18-21 VIII 1988, Actes, Tome I, 12-13.
- Gebhardt, A. & Langohr, R., 1999. Micromorphological studies of construction materials and living floors in the medieval motte of Werken (West-Flanders, Belgium). *Geoarchaeology*, 14, 595-620.
- IUSS Working Group WRB, 2014. *World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 181 pp.
- Langohr, R., 1991. Soil characteristics of the Motte of Werken (West-Flanders Belgium). In: *Methoden und Perspektiven der Archäologie des Mittelalters, Tagungsberichte zum interdisziplinären Kolloquium*, Sept. 1989 in Liestal (Schweiz) (Ed. Tauber, J.), 209-223. Archäologie und Museum, Heft 020, Berichte aus der Arbeit des Amtes für Museen und Archäologie des Kantons Baselland.
- Langohr, R., 2007. Informatie over bodemkundige opnamen op de archaeologische site van Edegem-Buizegen. Rapport ASDIS, 3 pp.
- Langohr, R., 2009. Sciences de la terre : les facteurs de l'environnement du site de Glimes et les sols. In: Le tumulus gallo-romain de Glimes (Incourt) (Eds. Massart C., Defgnée A., Langohr R. & 'T Kint S.), 34-54. Rapport 2003 des fouilles réalisées en 2002. Etudes et Documents, Archéologie 13, Namur, 100 pp.
- Langohr, R., 2016. La Forêt de Soignes – Site unique pour les sciences de la terre et l'archéologie. Comprendre l'évolution du paysage pédologique dans la région des loess en Belgique. Le facteur édaphique dans l'écologie forestière. Un aperçu de 45 ans de recherche. Excursion 08 Juillet 2016, Association Française des Sols – Soil Science Society of Belgium, 29 pp.
- Langohr, R. & Sanders, J., 1985. Etude pédologique du site de Darion: données préliminaires. *Bull. Sc. Roy. Belge d'Anthropologie et de Préhistoire*, 96, 17-30.
- Langohr, R. & Marcelino, V., 2012. Origin of the calcium carbonate of the bog marl deposit of the Moervaart Depression in the cover sand area of NW Belgium. Micromorphological evidences of decarbonation and clay migration under a permanent groundwater table in sand ridges. Poster presentation, 14th International Meeting on Soil Micromorphology, 8-14 July 2012, Lleida, Spain.
- Lenka, L., Bajer, A., Rejsek, K., Vranova, V., Vejrostova, L., Wisniewski, A. & Kristuf, P., 2019. Review of illuvial bands origin: what might the presence of dark brown bands in sandy infillings of archaeological objects or cultural layers mean? *Interdisciplinaria Archaeologica, Natural Sciences Archaeology*, X, 19-28.
- Massart, C., Langohr, R., Defgnée, A. & Preud'homme, D., 2003. Fouilles au tumulus de Glimes (Incourt, Prov. De Brabant Wallon). Romeinendag – Journée d'Archéologie romaine, 49-52.
- Mikkelsen, J. & Langohr, R., 1996. A pedological characterisation of the Aubechies soil, a well-preserved soil sequence dated to the earliest Neolithic agriculture in Belgium. In: Proc. XIII Int. Congress Prehistoric and Protohistoric Sciences, 143-149. Vol. 3: Paleoecology, Forly, Italy, Sept. 1996.

Omar, M., 1985. Study and survey of particular soil characteristic in relation to the archaeological site of Kerkhove, North-Western limit of the Belgian loess belt. Unpublished M.Sc. thesis, International Training centre for Post-Graduate Soil Scientists, University of Ghent, Belgium, 59 pp.

Pieters, M., 1986. Ontwikkeling en toepassing van bodemprospectietechnieken voor archeologische sites van de Belgische zand- en leemstreek. Niet gepubliceerde M.Sc. thesis, Univeriteit Gent, 138 pp.

Prusinkiewicz, Z., Bednarzek, R., Kosko, A. & Szmyt, M., 1994. Paleopedological studies on age, properties and genesis of illuvial bands on a neolithic archaeological site. *Soil Science Annual, suppl.*, xlv, 15-26.

Rogge, M. & Van Doorselaer, A., 1982. Belangwekkende opgravingen op de terreinen van de N.M.W. te Kerkhove. *Hydrographica*, 17 pp.

Schaetzl, R., 1992. Texture, Mineralogy, and Lamellae Development in Sandy Soils in Michigan. *Soil Science of America Journal*, 56, 1538-1545.

Slager, S. & van de Wetering, H., 1977. Soil formation in Archaeological Pits and Adjacent Loess Soils in Southern Germany. *Journal of Archaeological Science*, 4, 259-267.

Vandeveld, J. & Annaert, R., 2006. Archeologisch onderzoek Edegem-Buizegem 2005-2006. Vlaams Instituut voor het Onroerend Erfgoed, Intern Rapport, 41 pp.

Vandeveld, J., Annaert, R., Lentacker, A., Ervynck, A. & Vandenbruaene, M., 2006. Vierduizend jaar bewoning en begraving in Edegem-Buizegem (prov. Antwerpen). *Relicta*, 3, 9-68.

Vanmontfort, B., 2013. De Tomme van Ottenburg, het meest mysterieuze monument van Vlaanderen. *Archeologie* 2013. Recent archeologisch onderzoek in Vlaams-Brabant, 16-18.

Verhey, W. & Ameryckx, J.B., 2007. *Bodem & Bodemkunde voor tuin, landbouw en milieu*. Uitgever W. Ameryckx, Mariakerke-Gent, 262 pp.

Geraadpleegde website op 10/09/2025

<https://www.purposegames.com/game/transport-van-zand-door-de-wind>.

IN DIALOOG MET BODEMS VELDBODEMKUNDE VOOR ARCHEOLOGISCH ONDERZOEK



PODZOLEN EN WATERHARD MIGRATIE EN AANRIJING VAN OPLOSBAAR ORGANISCHE STOFFEN IN BODEMS

AUTEURS : ROGER LANGOHR
CAROLE AMPE
JARI HINSCH MIKKELSEN
SYLVIA MAZEREEL

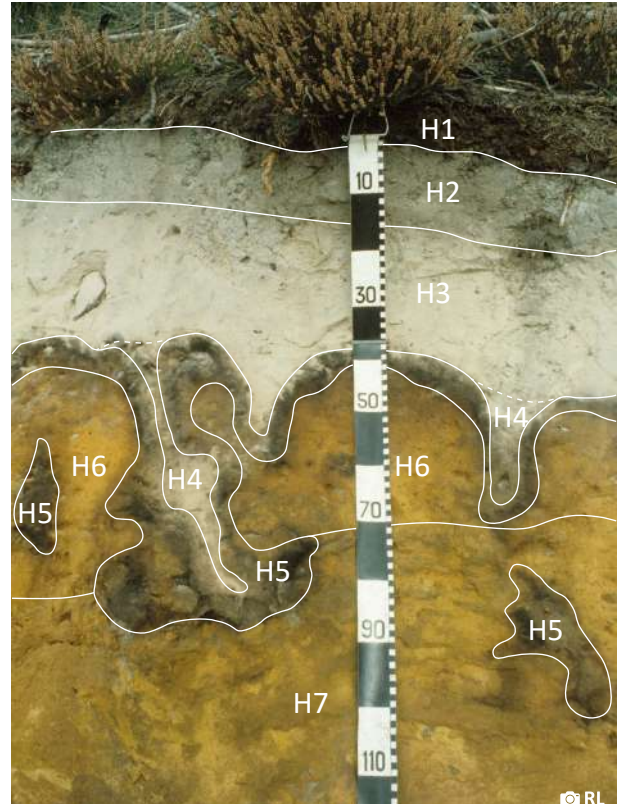
1. Inleiding

Podzolen worden gekenmerkt door een aanrijkhingshorizont van organisch materiaal en aluminium met of zonder ijzeroxiden. Boven deze aanrijkhingshorizont komt er dikwijls een witte of lichtgrijze uitlogingshorizont voor. De term ‘**podzol**’ komt uit het Russisch ‘*pod*’, onder en ‘*zola*’, as. De term ‘*zola*’ verwijst naar de aanwezigheid van de witte of lichtgekleurde bodemhorizont onder een zwarte humusrijke oppervlaktehorizont. Veel bodemclassificatiesystemen vereisen de aanwezigheid van deze lichtgekleurde uitlogingshorizont om geïnclassificeerd te kunnen worden als een podzolbodem (figuur P1).

Tijdens het podzoliseringsproces migreren de organische verbindingen, aluminium en ijzer van de oppervlaktehorizont met het doorsijpelend water. Dieper in het bodemprofiel slaan deze bestanddelen neer. Bij de afbraak van organisch materiaal in de strooisellaag en in de A-horizont worden naast koolstofdioxide, water en ammoniak en eenvoudige organische verbindingen (suikers, organische zuren), ook nog grotere organische moleculen gevormd, zoals fulvozuren en humuszuren (Van Ranst, 2001). De fulvozuren zijn in beperkte mate oplosbaar en kunnen zich binden aan metaalkationen zoals aluminium- en/of ijzerionen. Zo worden er organo-metaalcomplexen of **chelaten** gevormd. De chelaten, gevormd in het bovenste deel van het profiel, worden met het percolatiewater uit de oppervlaktehorizont en de E-horizont weggevoerd. Zolang er weinig ijzer en/of aluminium aanwezig is, blijven deze chelaten oplosbaar en kunnen ze migreren met het percolerend water. Gedurende het transport worden steeds meer aluminium en ijzer door de organo-metaalcomplexen opgenomen totdat uiteindelijk een verzadigingstoestand optreedt en er grote immobiele moleculen gevormd worden die dieper in het profiel neerslaan en zo een aanrijkhingshorizont vormen. Andere factoren die chelaten doen neerslaan, zijn:

- het uitdrogen van de bodem, zodat de ionische concentratie in de bodem toeneemt,
- een verandering in textuur in de bodem,
- de aanwezigheid van een watertafel met een verschillende ionische concentratie of zuurtegraad (De Coninck, 1980; Righi *et al.*, 1982; Van Ranst, 2001).

Het podzoliseringsproces vindt vooral plaats in zandige of zeer stenige bodems die meestal weinig ijzer en aluminium bevatten. In meer lemige en kleiige



H1: +8/4-0/8 cm: O; weinig verteerd strooisel van coniferen en heide (*mor* humustype).

H2: 0/8-11/21 cm: A; lichtgrijze oppervlaktehorizont aangerijkt met humus, mogelijk ooit bewerkt geweest.

H3: 11/21-36/55 cm: E1; witte ijzeruitlogingshorizont van de podzol.

H4: 36/50-68/82 cm: E2; tongen van de E-horizont ontwikkeld langs vroegere gangen van spilwortels van coniferen.

H5: 36/82-42/89 cm: Bh; zwartgrijze humusaanrijkhingshorizont van de podzol.

H6: 42/70-69/84 cm: Bs; bruine ijzeraanrijkhingshorizont van de podzol.

H7: 69/88-115+ cm: Bw (Bt, Bh); bruine gele ontkalkte verweeringshorizont van de originele zandsteen; met plaatselijk dunne klei-aanrijkhingsbandjes (de zandsteen bevatte oorspronkelijk een beetje klei) en humusinfiltratie van de podzol.

Fig. P1: Humus-ijzerpodzol onder een bosbestand van coniferen (*Pinus* sp.) en heide (*Calluna vulgaris*) op een zuidgerichte helling ontwikkeld in ontkalkte zandsteen (Buntsandstein). Le Châtelet, Lotharingen, provincie Luxemburg, België.

bodems treedt doorgaans het podzoliseringsproces niet op, omdat de chelaten onmiddellijk in de donkere humusrijke oppervlaktehorizont neerslaan. In de zandige en stenige bodems waar het ijzer wel kan migreren, ontstaat er een witte uitlogingshorizont. Bij het podzoliseringsproces heeft ook de zwarte humusrijke oppervlaktehorizont ijzer verloren, maar dat is niet zichtbaar door het hoge gehalte aan humus.

De hoge zuurtegraad van podzolen weerspiegelt zich in de aanwezigheid van een *mor* humustype aan het oppervlak (figuren P9, P10, P18, P26, P57, P58). Het strooisel verteert hier zo traag, dat er over de jaren heen een dikke, tot 10 cm of zelfs meer, organische laag ontstaat van slecht tot niet vergane bladeren, naalden en twijgjes. De opeenhoping van organisch materiaal is te wijten aan de zeer lage activiteit van de mesofauna (wormen) en de bacteriën. De ontbinding gebeurt vooral door schimmels. De C/N verhouding van het *mor* humustype is groter dan 25.

Waar het ijzer uitlooft zal er een witte uitlogingshorizont of E-horizont (of A2 op de Bodemkaart van België) ontstaan, vandaar de naam 'podzol' (zie hoger). Van zodra de migrerende chelaten terecht komen in een horizont rijk aan ijzer en/of aluminium, zullen de chelaten neerslaan in een aanrijkingshorizont, de Bs-, Bh- of Bhs-horizont. Veel podzolen in Noord-België zijn daarom slechts een paar decimeter dik. De aanwezigheid van een ondiep substraat van bijvoorbeeld tertiaire afzettingen met een fijne textuur en rijk aan ijzer en of aluminium doet de migrerende chelaten neerslaan (figuren P17-P20, P24, P26, P42, P43, P46, P47, P71-P76).

Drie belangrijke types van een podzol aanrijkingshorizont kunnen morfologisch onderscheiden worden: een ijzerhorizont (Bs), een humus/ijzerhorizont (Bhs) en een humushorizont (Bh).

Podzolisatie en waterhard (zie §4) zijn geen migraties van colloïden zoals klei en organische verbindingen maar van oplosbare stoffen. De lichter gekleurde uitlogingshorizont kan echter ook ontstaan wanneer kleicolloïden migreren. Deze colloïden hebben een negatieve lading die gedeeltelijk geneutraliseerd is door positieve ijzerionen (Fe^{3+}). De kleiuitloging produceert zo ook een lichter gekleurde E-horizont (zie thema 'Organische en minerale (klei) colloïdenmigratie'). Soms worden deze bodems en dan vooral in oudere bodemclassificaties, aangeduid met de term '*podzolic*'. Dit is zeer verwarrend, omdat de processen chelaatmigratie en kleimigratie, totaal verschillend zijn (Tavernier & Smith, 1957).

2. De kleur van organische stof in de podzolhorizont

De organische stoffen die in een podzol migreren en accumuleren, zijn niet altijd zwart. Vooral in de ijzer-bospodzolen en de grondwaterpodzolen (humuspodzolen) kunnen ze bruinrood, bruin, geel, lichtpaars en zelfs kleurloos zijn (figuren P8-P16, P24, P25, P34-P39, P61, P62, P73, P74). Aluminium is kleurloos. Om een zandige bodem te kleuren is er weinig ijzer of kleurstof nodig.

3. Podzolen in België

3.1. Algemeen

De podzolbodem is een bodemtype dat in België alleen voorkomt op zandige of zeer stenige gronden, met uitzondering van bodems ontwikkeld op kalksteen. Deze bodems hebben vooral de textuurklasse zand (Z) en in mindere mate lemig zand (S) volgens de Bodemkaart van België. In de Ardennen zijn de podzolen vooral ontwikkeld op 'arme' moedermaterialen zoals zandsteen, kwartsiet of schiefer en bevatten ze veel grind en stenen. Deze gronden worden op de bodemkaart aangeduid als stenige gronden (G) (e.g. Deckers, 1966: 73, 145). Ze komen vooral voor op zuidwest gerichte hellingen die meer neerslag ontvangen dan de andere hellingen. Op deze hellingen infiltreert meer regenwater en zal de bodem sneller verweren en verzuren, voorwaarden die nodig zijn voor de ontwikkeling van een podzolbodem (e.g. Avril, 1961: 51, 1971: 98; Platteborze, 1970: 69) (figuren P13-15).

In België worden een vijftal podzoltypes onderscheiden (tabel P1).

Symbool	Benaming	Bijkomende info:
f	ijzerpodzol	ook bospodzol genoemd
g	humus-ijzerpodzol	ook heidepodzol genoemd
g	humuspodzol	ook grondwaterpodzol genoemd
h	postpodzol	
-	micropodzol	niet gekarteerd

Tabel P1: De belangrijkste podzoltypes aanwezig in België en gekarteerd tijdens het opmaken van de Belgische bodemkaart (figuren P2-P5).

De belangrijkste bodemvormende factoren voor podzolen zijn:

- moedermateriaal: hoe armer aan nutriënten, hoe meer uitgesproken het podzoliseringsproces,
- klimaat: hoe groter het neerslagoverschot, hoe meer uitloging,
- vegetatie: hoe armer de strooisellaag, d.w.z. een hoge koolstof/stikstofverhouding, hoe beter,
- menselijke invloed (zie § 3.6).

Bepaalde termen komen veel voor in de Belgische literatuur over podzolen, die we verder zullen toelichten:

- cementatie, verharding (zie § 3.3),
- ortstein of rotse (*alios - Fr.*) (zie 3.3) (Sanders *et al.*, 1989: 39),
- uitlogingstongen (zie § 3.3),
- placic horizont (zie § 3.8),
- ijzeroer, oerijzer, moerasijzer (zie § 3.9).



◀ Fig. P2: IJzerpodzol of bospodzol (zie fig. P14). Lotharingen, provincie Luxemburg, België.



► Fig. P3: IJzer-humuspodzol (zie fig. P20). Beernem, het Aanwils, provincie West-Vlaanderen, België.



◀ Fig. P4: Humuspodzol of grondwaterpodzol (zie fig. P36). Brecht, provincie Antwerpen, België.



► Fig. P5: Postpodzol (zie fig. P42). Beernem, het Aanwils, provincie West-Vlaanderen, België.

3.2. IJzer- of bospodzolen

IJzer- of bospodzolen worden gekenmerkt door een uitlogingshorizont en een ijzeraanrijkingshorizont.

Onder bosbestand zijn de oplosbare organische stoffen hoofdzakelijk kleurloos. Hierdoor is de aanrijkingshorizont oranje gekleurd, omdat we slechts de kleur van de ijzeraanrijking zien (de Bs-horizont). Deze **'ijzerpodzolen'** worden soms ook **'bospodzolen'** genoemd (e.g. Edelman, 1960, 1962). Vandaag komen ze voor over uitgestrekte gebieden van het boreaal woud of de taiga in Scandinavië, Siberië, Noord-Canada en Alaska, maar ook bijvoorbeeld in de Alpen (figuren P6-P10). Dit zijn overwegend wouden van coniferen die een zure humus produ-

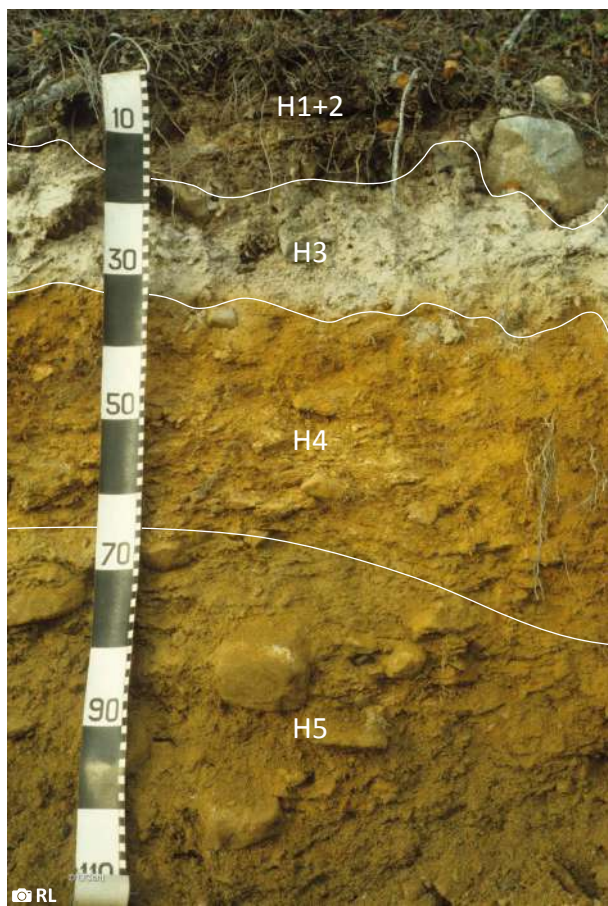
ceren. Het uitlogingsproces kan in de lente in deze streken zeer intens zijn, wanneer het sneeuwdek dooit en de precipitatie van meerdere maanden in korte tijd door de bodem percoleert. Hierdoor kan het podzoliseringsproces toch nog plaatsvinden in bodems die nog redelijk wat leem en klei bevatten (figuren P7-P10).



Fig. P6: Zicht op het boreaal woud. Noord-Finland.



Fig. P7: IJzerpodzol onder berk. Noord-Finland.



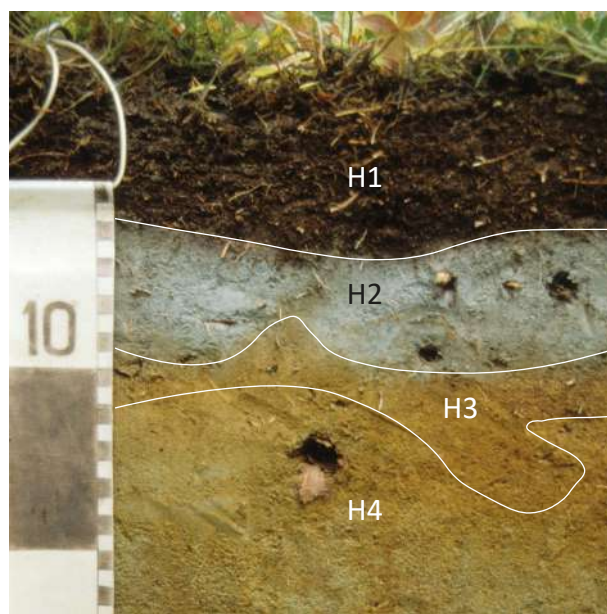
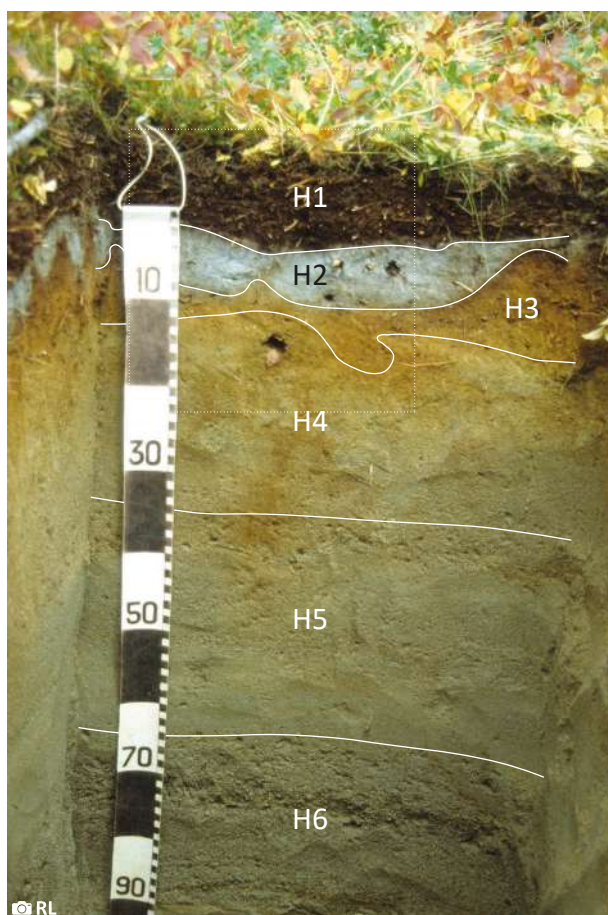
H1+H2: 0-10/19 cm: O+A.

H3: 10/19-31/38 cm: E; uitlogingshorizont.

H4: 31/38-63/78 cm: Bs; ijzeraanrijkingshorizont.

H5: 63/78-110 cm: Bw; structuur B-horizont met plaat- en lensstructuur door vries/dooi cycli.

Fig. P8: Detail van ijzerpodzol onder berk (zie fig. P7). Noord-Finland.



H1: +8-0 cm: Oi; *mor* humustype.

H2: 0-5/10 cm: E; uitlogingshorizont.

H3: 5/10-12/18 cm: Bs; ijzeraanrijkingshorizont.

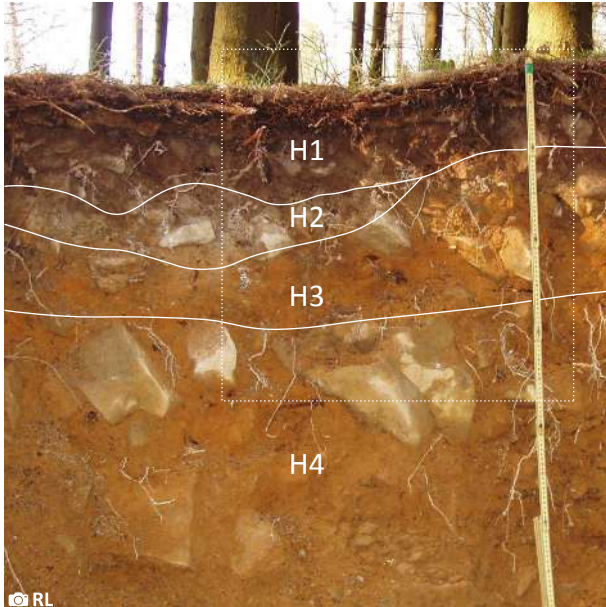
H4: 12/18-36 cm: B.

H5: 36-66 cm: 2C.

H6: 66-92 cm: 3C.

Fig. P9-P10 (detail): IJzerpodzol onder toendra. Tromsø, Noorwegen.

182 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



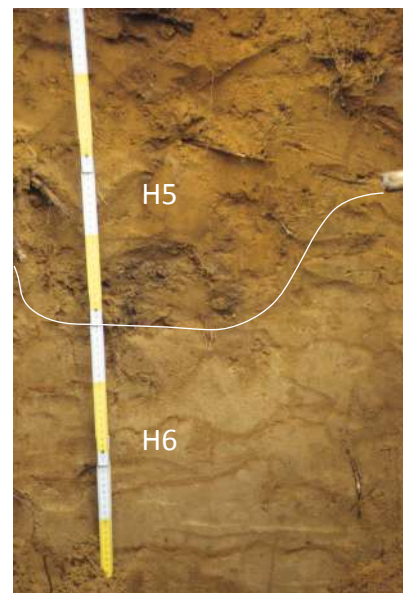
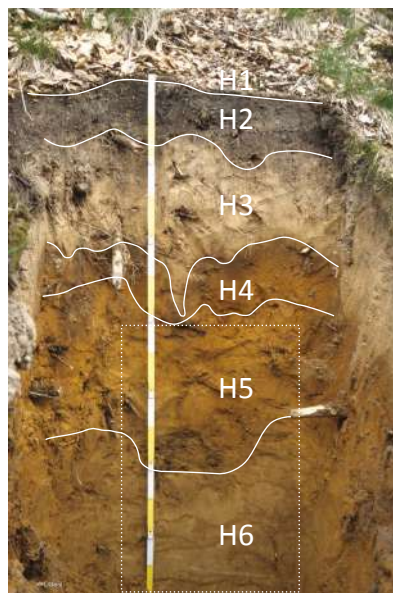
H1: 0-20/33 cm: A.

H2: 25/33-25/45 cm: E; de E-horizont is weinig uitgesproken.

H3: 20/45-56/60 cm: Bs1; ijzeraanrijkingshorizont met een kruimelige structuur en goede doorworteling.

H4: 56/60+ cm: Bs2; tweede minder uitgesproken ijzeraanrijkingshorizont.

Fig. P11-12: Gemengd loofbos op een plateau met kwartsietrijk gesteente. Champlon, provincie Luxemburg, België.



H1: 2-0 cm: Oi; strooisellaag.

H2: 0-13/23 cm: A; humusrijke oppervlaktehorizont.

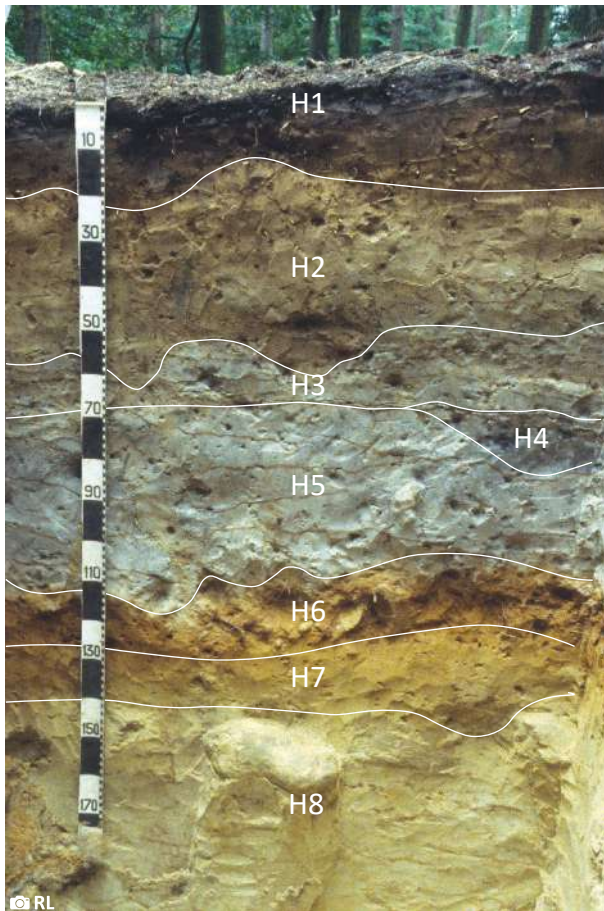
H3: 13/23-40/60 cm: E; uitlogingshorizont.

H4: 40/60-50/62 cm: Bs; ijzeraanrijkingshorizont.

H5: 50/62-85/103 cm: B.

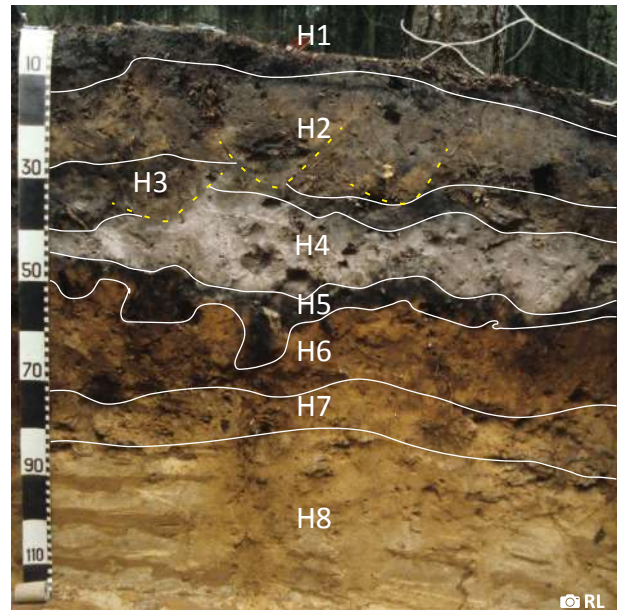
H6: 85/103-136 cm: E/Bt; fijne klei-aanrijkingbandjes.

Fig. P13-P15: Gemengd loofbos. Zuidwest gerichte helling. Zand afkomstig van ontkalkte kalkzandsteen. Lotharingen, provincie Luxemburg, België.



- H1+H2: de aarden wal bestaat uit lemig sediment.
 - H1: 0/+15-12/23 cm: ^Ah; humusrijke oppervlaktehorizont.
 - H2: 12/23-47/64 cm: ^Bw; kleur B-horizont.
- H3: 47/64-65/70 cm: Ab1; restanten van de humeuze oppervlaktehorizont van de begraven ijzerpodzol.
- H4: 67/71-67/84 cm: Ab2; resten van de humeuze oppervlaktehorizont van de begraven ijzerpodzol.
- H5: 67/84-103/118 cm: Eb; ijzeruitlogingshorizont van de podzol; enkele fijne klei-aanrijkingslamellae (Bt) afkomstig van de aarden wal.
- H6: 103/118-121/130 cm: Bsb1; maximale ijzeraanrijkingshorizont van de ijzerpodzol.
- H7: 121/130-139/150 cm: Bsb2; overgangshorizont.
- H8: 139/150-175 cm: Cb; tertiair zand met enkele silicium-zandstenen, het moedermateriaal van de podzol, enkele fijne klei-aanrijkingslamellae (E/Bt).

Fig. P16: Hallstattfortificatie in het Hallerbos. Volledig bodemprofiel met een ijzerpodzol ter hoogte van de aarden wal. De horizontsymbolen zijn uitgelegd in Mikkelsen *et al.*, 2022. Braine-le-Château, provincie Waals-Brabant, België. (Fourny & Van Assche, 1988).



- H1: 0/13-6/20: Oi+^A; strooisellaag en humusrijke oppervlaktehorizont.
- H2: 6/20-25/35 cm: ^B; leemgrond aangebracht na nivellering van de originele aarden wal; met spitsporen (gele streepjes).
- H3: 25/35-32/41 cm: Ab; resten van de A-horizont van de humus-ijzerpodzol.
- H4: 32/41-45/55 cm: Eb; uitlogingshorizont.
- H5: 45/55-50/68 cm: Bhb; podzol-humushorizont.
- H6: 50/68-70/77 cm: Bsb; originele podzol-ijzerhorizont.
- H7: 70/77-80/88 cm: Bb; overgangshorizont.
- H8: 80/88-110+ cm: E/Btb; ont kalkt tertiair zand met kleiaanrijkingslamellae.

Fig. P17: Begraven humus-ijzerpodzol. De bodem ligt op 15 m afstand van het profiel getoond in fig. P16. Braine-le-Château, provincie Waals-Brabant, België. (Fourny & Van Assche, 1988).

De interpretatie: Na de Hallstattperiode is deze plaats onder begrazing gekomen. Waarschijnlijk heeft er zich een heidevegetatie ontwikkeld met de vorming van een podzol-humushorizont (H3, H4 en H5) die gemigreerd is tot op de vroegere podzol-ijzerhorizont (H6). In de diepte in het tertiair zand, is er een kleimigratiehorizont gevormd (H8). De horizontsymbolen zijn uitgelegd in Mikkelsen *et al.*, 2022.

Later is de aarden wal, bestaande uit leemgrond, sterk genivelleerd, waarschijnlijk voor de aanleg van een akker (H2). Daarna is de site terug onder bos gekomen met ontwikkeling van een strooisellaag (H1).

In de Ardennen en Belgisch-Lotharingen komen vandaag nog steeds bospodzolen voor, zowel onder coniferen als onder loofbos (figuren P11-P15). Dit is vooral het geval op arm bodemmoedermateriaal zoals zandsteen en kwartsiet en bij voorkeur op zuidwest gerichte hellingen die meer neerslag ontvangen dan de andere hellingen (figuren P13-P15).

Voordat de mens het bos ontgon, kwamen bospodzolen ook voor op de zandige bodems (meestal dekzanden) van Noord-België (Lamberts & Baeyens, 1963). Deze bospodzolen kunnen we nog observeren op **archeologische sites** waar ze begraven en beschermd zijn door de aanleg van bijvoorbeeld wallen (figuur P16) en *tumuli* uit het neolithicum (Scheys, 1963; Vergauwe, 2012). Onder archeologische structuren uit de bronstijd, bijvoorbeeld *tumuli*, zijn eerder humus-ijzerpodzolen bewaard gebleven, maar alle overgangsvormen zijn mogelijk (Scheys, 1963).

De ijzeraanrijkingshorizont van bospodzolen (De Coninck *et al.*, 1986)

- is niet gecementeerd,
- vertoont geen ijzerconcreties; ijzerconcreties duiden op de invloed van grondwaterschommelingen,
- vertoont geen aanrijkingsslamellae (dunne bandjes),
- bezit een wortelconcentratie, omdat deze horizont meer water kan ophouden t.o.v. de bovenliggende bleke E-horizont.

Op de Bodemkaart van België worden deze bodems dikwijls vermeld met het symbool 'f' voor profielontwikkeling. Dit zijn gronden met een 'weinig duidelijke humus of/en ijzer B horizont'.

3.3. Humus-ijzerpodzolen, of de menselijke invloed op de bodemgenese in de Belgische zandstreek

In zandige bodems **onder heide en andere vegetaties met een zeer zure strooisellaag zoals coniferen**, komen **humus-ijzerpodzolen** voor. De oplosbare humusstoffen hebben hier een donkere, meestal zwarte kleur. Deze stoffen slaan neer boven de ijzeraanrijkingshorizont van de originele ijzerpodzol: de Bs- wordt een Bhs-horizont (figuren P17-P22, P27, P49, P50, P65, P66, P71-P76). In de zandstreek heeft het ontbossen en de degeneratie van het bos geleid tot de ontwikkeling van een heidevegetatie. Dit heeft een grote impact gehad op het bodemklimaat. Onder bos is de evapotranspiratie door de bomen hoger dan onder heide waardoor de verzuuring en de uitloging van de bodem onder heide veel intenser is.

Vooraf vanaf de bronstijd werden landbouw en veeteelt steeds belangrijker met als gevolg dat de bossen verdwenen en vervangen werden door heidevegetatie. Door schapenbegrazing werd de heidevegetatie in stand gehouden. Dit versnelde de bodemverzuring en zo werden uitgebreide zones van humus-ijzerpodzolen gevormd. Vandaag treffen we onder bos soms humus-ijzerpodzolen aan (figuren P17-P20). Dit toont aan dat er vroeger vermoedelijk heide van het type struikheide (*Calluna vulgaris*) heeft gegroeid en dat het gebied begraasd is geweest met schapen.

De humus-ijzeraanrijkingshorizont van deze bodems:

- kan licht tot sterk gecementeerd zijn, dit noemt men '**ortstein**' of '**rotse**' (figuur P20) en wordt in het veld aangeduid met de horizontsymbolen 's' en 'm' (Mikkelsen *et al.*, 2022);
- kan de wortelgroei sterk beperken (figuren P20, P24, P25, P65, P66);
- vertoont normaal gezien geen ijzerconcreties. Ijzerconcreties worden gevormd onder een fluctuerende grondwaterstand. Bij een hoge grondwaterstand is het bodemmilieu gereduceerd, bij lage grondwaterstand geoxideerd. In reducerende omstandigheden kan ijzer migreren, tijdens de oxidatie slaat ijzer neer en kunnen ijzerconcreties gevormd worden (dit geldt voor alle podzolen) (figuren P20, P42, P43, P46, P47, P71-P76);



Fig. P18: De oorspronkelijke bodem was een ijzerpodzol gevormd onder bos. Later werd het bos gekapt en het perceel begraasd. Er vormde zich een humus-ijzerpodzol. Vandaag ligt het perceel terug onder een gemengd bos. Vogezen, Frankrijk.



Fig. P19: Humus-ijzerpodzol onder een gemengd bosbestand. Een voorbeeld van een Bhs-horizont die goed doorworteld is. Brochterbeck, Duitsland.

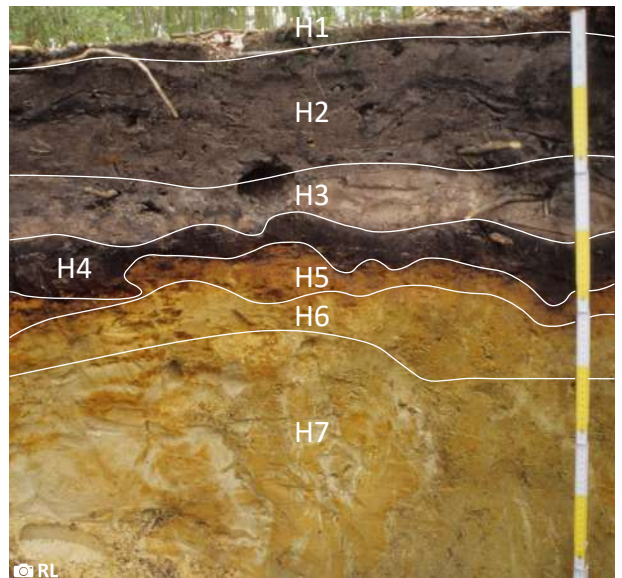


Fig. P20: Humus-ijzerpodzol onder gemengd loofbos.

De bodemevolutie:

1. Afzetting van zo'n 40 cm dekzand tijdens het Pleniglaciaal op gecryoturbeerd tertiair materiaal.
2. Onder loofbos, ontwikkeling van een ijzerpodzol (Bs).
3. Latere begrazing met heide, ontwikkeling van de Bh-horizont.
4. Nivellering en aanleg van een akker met ontwikkeling van een Ap-horizont tijdens een periode van hongersnood (mogelijk 19de eeuw of tijdens oorlogsperiode).
5. Terug onder gemengd loofbos (huidige toestand) met ontwikkeling van een strooisellaag (Oe).

De horizonsymbolen zijn uitgelegd in Mikkelsen *et al.*, 2022. Beernem, het Aanwij, provincie West-Vlaanderen, België. (Ampe & Langohr, 2006).

H1: +2-0 cm: Oe; strooisellaag.

H2: 0-20/22 cm: Ap; oude ploeglaag.

H3: 20/22-27/34 cm: E; uitlogingshorizont.

H4: 27/34-32/42 cm: Bh(m); licht gecementeerde humus B-horizont.

H5: 32/42-38/49 cm: Bsm; gecementeerde ijzer B-horizont.

H6: 38/49-45/52 cm: B.

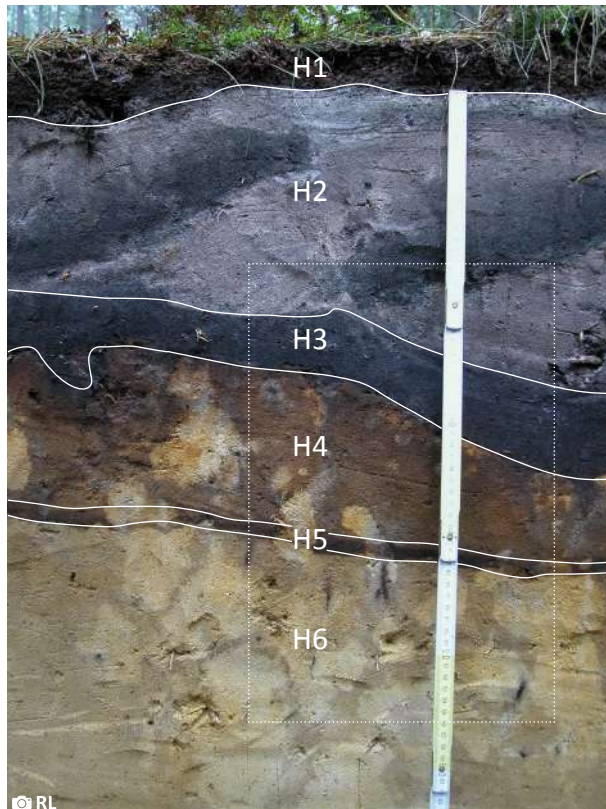
H7: 45/52-73+cm: C@; tertiair kleig-zand en zandige klei, met sporen van kryoturbatie.



Fig. P21-P23: De invloed van de vegetatie op de podzolontwikkeling. Fig. P21 (boven): transect op een steile helling in de Ardennen. Bodem ontwikkeld op schiefer. Fig. P22 (links): humus-ijzerpodzol met goede doorworteling ontwikkeld onder een spar van 60-80 jaar oud. Fig. P23 (rechts): de 'normale' bodem, ook nog 'prepodzol' genoemd, met een bruine Bw-horizont. Interpretatie: Podzolontwikkeling kan zeer vlug optreden. Ardennen, België.

- kan een zeer onregelmatige begrenzing vertonen met instulpingen van de uitlogingshorizont (E-horizont) omgeven door de zwarte Bh-horizont. Vermoedelijk houdt dit verband met vergane spilwortels die aanwezig waren vóór de podzolontwikkeling (figuren P26-P29) en met oude bodemverstoreningen zoals ontwortelde bomen (figuur P30) en vergane boomstronken (figuur P31).

Microbiologische activiteit in humus-ijzerpodzolen (figuren P24, P25, P49, P50) toont waar organisch materiaal en ijzer in de podzolhorizont aanwezig zijn.



H1: +5-0 cm: O; strooisellaag van *Pinus*.

H2: 0-19/26 cm: Ap; eenmalig geploegd met fragmenten van de originele E- en A-horizont.

H3: 19/26-24/36 cm: Bhm1; zwarte gecementeerde horizont.

H4: 24/36-38/42 cm: Bhsm; bruinrode gecementeerde horizont.

H5: 38/42- 41/43 cm: Bhm2; zwarte aanrijksband op een laagje met een iets meer lemige textuur.

H6: 41/43-62 cm: B(h); lichte humusaanrijksband, in de lichtbeige vlekken is het organisch materiaal verteerd door microbiologische activiteit.

Fig. P24: Humus-ijzerpodzol aangetast door microbiologische activiteit. Pijnven Bos, Hechtel-Eksel, provincie Limburg, België. (Mikkelsen *et al.*, 2007).



Fig. P25 (detail van fig. P24): De microbiologische activiteit verteert de organische stof en toont zo waar ijzer (Bhsm) en organische stof (Bhm1, Bhsm, Bhm2, B(h)) voorkomen.

Interpretatie: na de periode met heide en humus-ijzerpodzol ontwikkeling, is er een eenmalige bodembewerking geweest met het telen van lupine voorafgaand het aanplanten van *Pinus*. Lupine brengt stikstof in de bodem door fixatie van stikstof uit de lucht wat de microbiologische activiteit activeert. De microbiologische activiteit verteert de organische stof in de bodem en veroorzaakt zo de blekere vlekken in het profiel

Pijnven Bos, Hechtel-Eksel, provincie Limburg, België. (Mikkelsen *et al.*, 2007).

Humus-ijzerpodzolen vertonen soms instulpingen (figuren P26-P33)



Fig. P26: Een humus-ijzerpodzol onder coniferen (*Pinus* sp.) en heide. Talrijke instulpingen van de uitlogingshorizont omringd door de humus-ijzeraanrijningshorizont. Le Châtelet, Lotharingen, provincie Luxemburg, België.

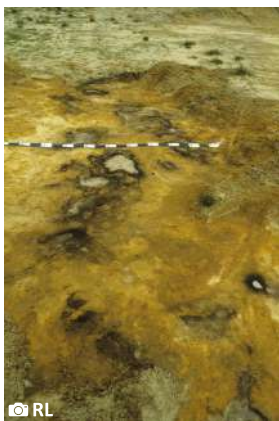


Fig. P27-P29: Details van fig. P26 op horizontale vlakken. De instulpingen volgen het spoor van de spilwortels van een coniferenbos aanwezig vóór en tijdens de podzolontwikkeling.



Fig. P30: Een humus-ijzerpodzol met sterke instulpingen van de E-, Bh- en Bs-horizonten die sporen volgen van een ontwortelde boom. Hallerbos, Halle, België. (Fourny & Van Assche, 1988).



Fig. P31: Een humus-ijzerpodzol met sterke instulpingen van de E-, Bh- en Bs-horizonten die sporen volgen van een verdwenen boomstronk. Brecht, provincie Antwerpen, België.

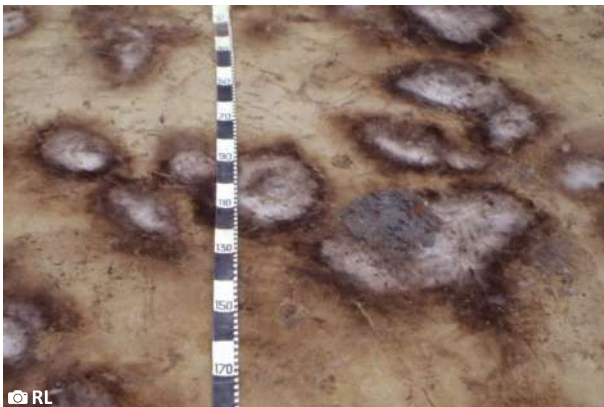


Fig. P32-P33: Horizontaal vlak op 50-60 cm diepte in een zandbodem. Talrijke sporen van instulpingen in een humus-ijzerpodzol. IJzertijd begraafplaats. Kemzeke, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Bourgeois, 1988).

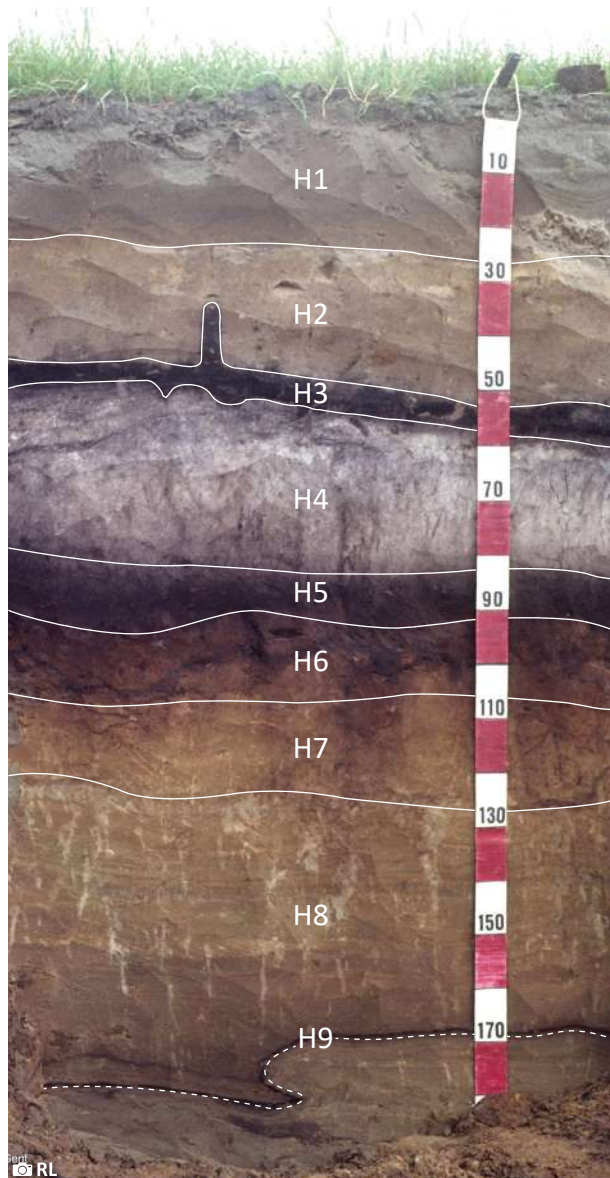
3.4. Humuspodzolen en/of grondwaterpodzolen

Men kan twee vormen van humuspodzolen onderscheiden. Het eerste type is ontwikkeld in zeer arme kwartszanden zonder grondwater en zonder ijzer, maar deze bodems komen, tenzij op de stuifzanden in de Kempen, in België zelden voor. Het tweede type komt veel voor in bodemmilieus met een fluctuerende grondwatertafel die periodiek tot dicht tegen het maaiveld komt. In deze milieucondities bevat de bodem weinig of geen zuurstof en wordt het ijzer tijdelijk gereduceerd van Fe^{3+} naar Fe^{2+} . De gereduceerde vorm van ijzer is oplosbaar en kan met het lateraal bewegende grondwater hellingafwaarts geleidelijk uit de bodem verdwijnen. Hierdoor ontbreekt de ijzeraanrijkingshorizont en ontstaat er alleen een humusaanrijkingshorizont. Omdat het ijzer uit het profiel is verdwenen, kan de humusaanrijking veel dieper in de bodem mi-

greren. Hellingafwaarts kan aan of dichtbij het bodemoppervlak het ijzer eventueel terug neerslaan als 'ijzeroer' of 'moerasijzer' zoals bijvoorbeeld in moerasdepressies (figuren P77-P81) (zie § 3.8). Al in de Romeinse tijd was moerasijzer een grondstof voor ijzerproductie.

De kleur van de humusaanrijkingshorizont van de grondwaterpodzolen kan variëren van zwart, bruin, bruinrood tot geelachtig (figuren P34-P39). Deze horizont is dikwijls zeer compact en soms gecementeerd, een fluctuerende grondwatertafel kan immers bodemverdichting veroorzaken! Het is vaak een wortelbeperkende laag. De aanrijking van humus kan de vorm van dunne bandjes aannemen.

190 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



H1: ^Ap; huidige ploeglaag.

H2: ^C; nivelleringslaag zonder bodemgenese.

H3: Ab; begraven originele zwarte humusrijke oppervlaktehorizont ontwikkeld onder bos, na vernatting van de omgeving.

H4: Eb; lichtgrijze uitlogingshorizont met sporen van vergane wortels.

H5: Bh(m)b; zwarte humusaanrijkingshorizont, zwak gecementeerd.

H6: Bh(s)mb; donkerbruinrode humus- en zeer zwakke ijzeraanrijkingshorizont, matig gecementeerd.

H7: Bhb; bruine humusaanrijkingshorizont.

H8: BC(h)b; lichtolijfbruine humusaanrijkingshorizont, gestratificeerd zand, de subverticale blekere tongen zijn oude biogalerijen.

H9: CBhb; zwart humusaanrijkingbandje van ongeveer 1 cm dik op het contact van de permanente grondwattafel. Dit bandje heeft een onregelmatig verloop en volgt een oude periglaciale sedimentinvolutie. Vermoedelijk is dit een waterhardbandje (zie § 4) afkomstig van een naburige vroegere veenlaag.

Fig. P34: Een begraven humus/grondwaterpodzol

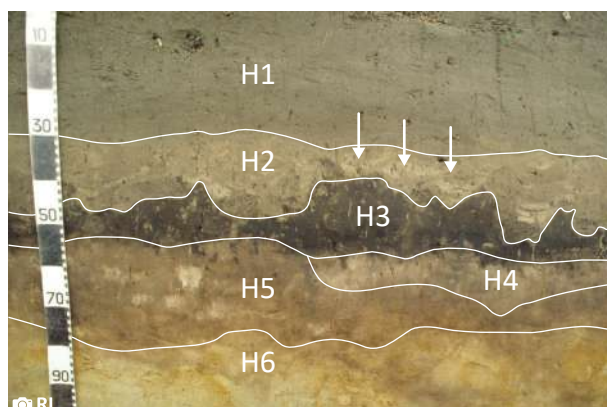
Interpretatie:

H1-H2: Nivelleringsaarde aangebracht van een landduin.

H3-H9: Podzolbodem ontwikkeld in laatglaciale dekzanden met textuurklasse S. Imperfect gedraineerde bosbodem.

De humusaanrijking in H5 tot H9 komt door migratie van opgeloste organische stoffen vanaf de oppervlaktehorizont van de begraven podzolbodem (H3). Bijna alle kleuren van het podzolprofiel (H5-H9) zijn te wijten aan organische stoffen met kleurschakeringen gaande van zwart, bruinrood, bruin, lichtolijfbruin en zeer donkerbruin. De grijsbruine kleur van de ploeglaag (H1) is ook te wijten aan humusstoffen. De horizontalsymbolen zijn uitgelegd in Mikkelsen *et al.*, 2022.

Dekzandstreek, Aalter, provincie Oost- Vlaanderen, België.



H1: 0-31/35 cm: ^Ap1; huidige ploeglaag in aangebrachte aarde.

H2: 31/35-39/53 cm: ^Ap2; tweede ploeglaag in aangebrachte aarde met sporen van spadesteken (pijlen).

H3: 39/53-52/58 cm: Ab; originele, zwarte humusrijke begraven oppervlaktehorizont: kleur kenmerkend voor een nat bosbestand.

H4: 55/58-55/71 cm: Eb; plaatselijk aanwezig, met iets lichtere kleur typisch voor een uitlogingshorizont.

H5: 52/71-73/81cm: Bhb; humusaanrijking kenmerkend voor een grondwaterpodzol.

H6: 73/81-96 cm: Cb; licht gekleurd zandig moedermateriaal.

Fig. P35: Een humus/grondwaterpodzol begraven door het nivelleren van een zandrug. Aalter Woestijne, provincie Oost-Vlaanderen, België.

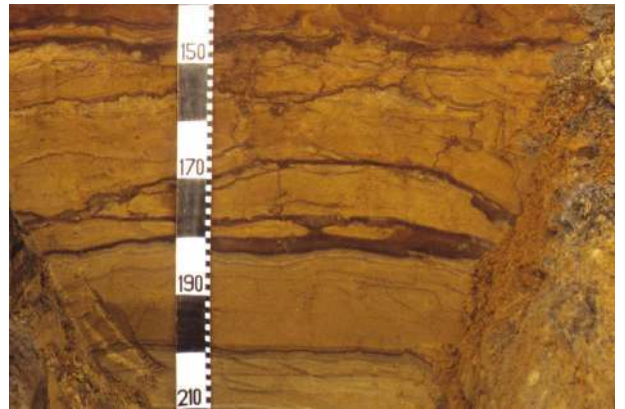


Fig. P37 (boven) en fig. P38 (onder), details van fig. P36.

Fig. P36: Diepe, goed ontwikkelde humus/grundwaterpodzol. Alle kleuren zijn te wijten aan organische stoffen. De zandige textuur van het volledige profiel en de afwezigheid van ijzer dat al eerder uitgeloozd was door laterale grondwaterbewegingen, maakt een diepe bodemontwikkeling mogelijk. Voet van een duin. Brecht, provincie Antwerpen, België.



Fig. P39: Humus/grundwaterpodzol in gedraineerde zandige meerafzettingen. Lommel, Maatheide, provincie Limburg, België. (Tomasso *et al.*, 2021).

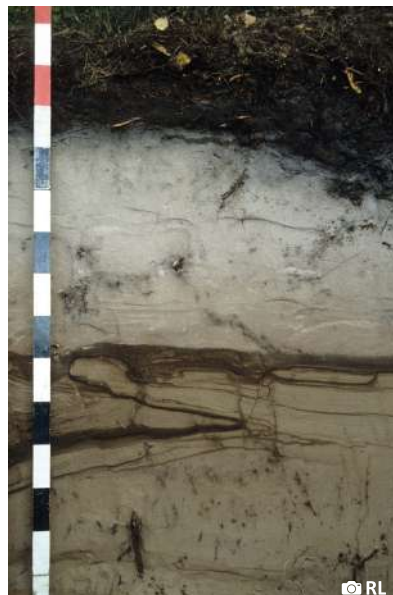


Fig. P40: Humus/grundwaterpodzol. Hamburg, Duitsland.



Fig. P41: Humus/grundwaterpodzol daterend uit het Eem interglaciaal (126.000-116.000 jaar geleden), begraven onder Weichsel alluvium. Kanaal Brugge-Gent, Beernem, provincie West-Vlaanderen, België.

3.5. De postpodzol, een antropogene bodemdifferentiatie tussen Vlaanderen en de Kempen.

Het ontwikkelen van een podzolbodem vereist een zeer nutriëntenarme zure bodem (zie boven). Ook de vegetatie speelt een belangrijke rol, maar de menselijke impact op het bodemecosysteem is eveneens essentieel. Het verschil in bodembeheer gedurende eeuwen tussen de zandige bodems van Oost- en West-Vlaanderen en de Kempen, vertaalt zich in de morfologie van de podzolprofielen.

Vlaanderen kende reeds in de middeleeuwen een hoge bevolkingsdichtheid met de steden Ieper, Brugge en Gent. Tijdens de grote middeleeuwse ontginningen, tussen de 10de en de 13de eeuw (Verhulst, 1964: 55) heeft de mens door intensieve landbouw, het bodemlandschap drastisch gewijzigd. Belangrijke **ingrepen werden in de landbouw doorgevoerd** zoals bodemnivellering, bodembemesting, wijziging van het vruchtwisselingsysteem, bodembewerking, intensieve begrazing (weiden).

Bodemnivellering

Observaties van groeven en talrijke archeologische opgravingen in Vlaanderen hebben aangetoond dat het nivelleren van landbouwgronden een zeer belangrijke activiteit is geweest in de zandstreek. Dit heeft een **niet te onderschatten invloed gehad op het archeologisch erfgoed**.

Over het algemeen is de topografie van de zandstreek vandaag zeer vlak. Nochtans was er oorspronkelijk een micro- en mesoreliëf aanwezig, gevormd door eolische (wind) zandige afzettingen. Over grote oppervlakten lag de grondwatertafel redelijk dicht bij het oppervlak. De depressieposities met dikwijls grondwaterpodzolen of zelfs met venige bodems, waren te nat voor landbouw. Daartegenover waren de hogere landschapsposities met humus-ijzerpodzolen te droog, omdat zand een laag waterophoudend vermogen heeft. Door het nivelleren werden hoger gelegen delen van het landschap afgegraven en de depressies opgevuld (figuren P42, P43). Dit maakte het mogelijk om het landbouwareaal aanzienlijk uit te breiden. Het nivelleren was enerzijds verantwoordelijk voor een belangrijke antropogene erosie van het drogere faciës van het bodemlandschap. Anderzijds liggen de bodems van de nattere delen, waaronder grondwaterpodzolen en veenbodems, dikwijls mooi begraven onder tientallen centimeters aarde afkomstig van de

hogere landschapsposities (zie thema 'Erosie en sedimentatie'). We kunnen vermoeden dat men ook terzelfdertijd alle *tumuli*, dikwijls gebouwd met humusrijke zoden, perfect heeft genivelleerd. Deze *tumuli* waren immers opgebouwd uit voor landbouwdoeleinden 'goede grond', rijk aan nutriënten, humus, silt en klei. Hierbij werden eveneens de bodems in lagere landschapsposities begraven (zie thema 'Erosie en sedimentatie'). Door deze nivelleringen, werd het reliëf over relatief korte afstanden sterk vervlakt en werd het verband tussen bodemtype en landschapspositie uitgewist. Dit maakte de bodemkartering van de Belgische bodemkaart van deze genivelleerde podzolgronden zeer moeilijk, zelfs met boringen om de 75 m. Deze complexiteit van het bodemlandschap is een van de belangrijkste redenen voor het uitvoeren van een aardkundig booronderzoek bij een eerste stap van het archeologisch onderzoek.

Bodembemesting

Bodembemesting bestond uit allerlei activiteiten zoals bijvoorbeeld de invoer van as uit Nederland (een bijproduct van het branden van veen), transport van stadsafval (beer...) naar het platteland of verhoging van mesttoevoer dankzij het vergroten van de veestapel (Pieters, 1990). Dit beheer resulteerde in een toevoer van fosfor en vooral stikstof en activeerde daardoor de bodemmicrobiologische activiteit (Tavernier & Amerijckx, 1957). Hierdoor werd de zwarte humusaanrijkingshorizont van de podzol die dikwijls gecementeerd was, gedeeltelijk verteerd. De gecementeerde horizont werd geleidelijk aan zachter, desintegreerde en kreeg een verbrokkeld uitzicht. De beworteling (figuren P42, P43) kon toenemen. Dit was een van de belangrijkste processen in de ontwikkeling van de **Postpodzolen**, of 'gronden met verbrokkelde humus en/of ijzer B-horizont' (symbool 'h' voor profielontwikkeling op de Bodemkaart van België), vandaag een veel voorkomend bodemtype in Vlaanderen (figuren P42-P47). Een bijzondere vorm van deze bodems vertoont een **gevlekte morfologie** als gevolg van de bacteriële consumptie van de organische stof (figuren P24, P25, P65, P66). Dit proces kan vandaag nog steeds actief zijn wegens input van stikstof door luchtpollutie.

Vruchtwisseling

De **vruchtwisseling** veranderde met het verlaten van het braakland. Klaver en/of brem werden ingezaaid om het stikstofgehalte in de bodem te verhogen en de landbouwproductie te vergroten. Klaver

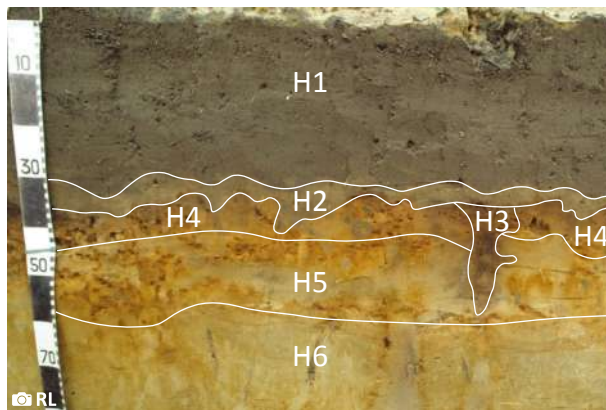
en brem behoren tot de familie van de vlinderbloemigen die stikstof uit de lucht kunnen fixeren en in de bodem brengen. Deze gewassen dienden ook als veevoeder en zo kon men meer vee houden wat opnieuw leidde tot een hogere mestproductie (Lindemans, 1952).

Bodembewerking

De **bodembewerking** werd veel intensiever door dieper te spitten en te ploegen (figuren P57, P58). Organische stof en mest werden hierdoor dieper in de bodem gebracht, wat het bodemvolume voor wortelontwikkeling in deze oorspronkelijke arme zandbodems, sterk vergrootte. De licht gekleurde nutriëntenarme uitlogingshorizont (E-horizont) werd vermengd met de ploeglaag (Ap-horizont) die vandaag tussen 30-60 cm dik kan zijn. Soms werd

ook de top van de podzol B-horizont vermengd en gehomogeniseerd. De bodem werd bewust tot drie spadensteken diep bewerkt waardoor de compacte en/of gecementeerde Bh gebroken werd (David, 1984) (figuren P44, P45). Op de Bodemkaart van België hebben de bodems gekenmerkt door een diepe bodembewerking, het symbool 'm' voor profielontwikkeling gekregen, dit zijn 'gronden met diepe antropogene humus A horizont – Plaggengronden en Antropogene gronden'. Soms werd als variant van de profielontwikkeling het '(o)' symbool gebruikt voor 'een sterk antropogene invloed' (Van Ranst & Sys, 2000). Vele van deze bodems hebben een 'dubbele ploeglaag' (Ap1 en Ap2) ontstaan door eeuwenlange beddenbouw. De onderste grens van de Ap2 vertoont dikwijls duidelijke spitsporen (figuur P43).

Bodemevolutie door intensieve landbouw (figuren P42-P47)



H1: 0-30/34 cm: Ap1; huidige ploeglaag.

H2: 30/34-33/40 cm: Ap2; restant van een oudere ploeglaag.

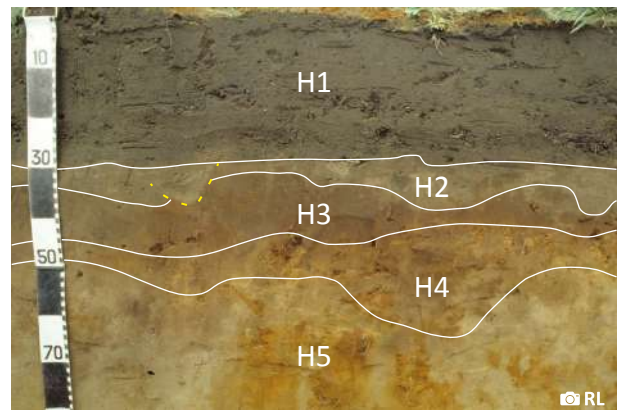
H3: 36-36/60 cm: Bh; diepe instulping van een podzol humus horizon.

H4: 33/40-41/47 cm: BhI; roestvlekken te wijten aan fluctuerende grondwatertafel.

H5: 41/47-58/62 cm: Bl.

H6: 58/62-80 cm: Cr.

Fig. P42: Postpodzol. De oorspronkelijke podzolbodem is gedeeltelijk weggegraven, gedeeltelijk opgenomen in de ploeglaag. Een diepe instulping van de Bh-horizont is bewaard gebleven. Aalter Woestijne, provincie Oost-Vlaanderen, België.



H1: 0-31 cm: Ap1; huidige ploeglaag.

H2: 31-32/43 cm: Ap2; iets lichter gekleurde tweede bewerkingshorizont, aan de onderzijde spitsporen (gele streepjes).

H3: 32/43-44/48 cm: Bh; restant van een grondwaterpodzol met een humusaanrijkhingshorizont.

H4: 44/48-48/67 cm: Bl; roestvlekken te wijten aan fluctuerende grondwatertafel.

H5: 48/67-78 cm: Cl.

Fig. P43: Postpodzol. De humusaanrijkhingshorizont (Bh) is nog aanwezig in het profiel. Aalter Woestijne, provincie Oost-Vlaanderen, België.

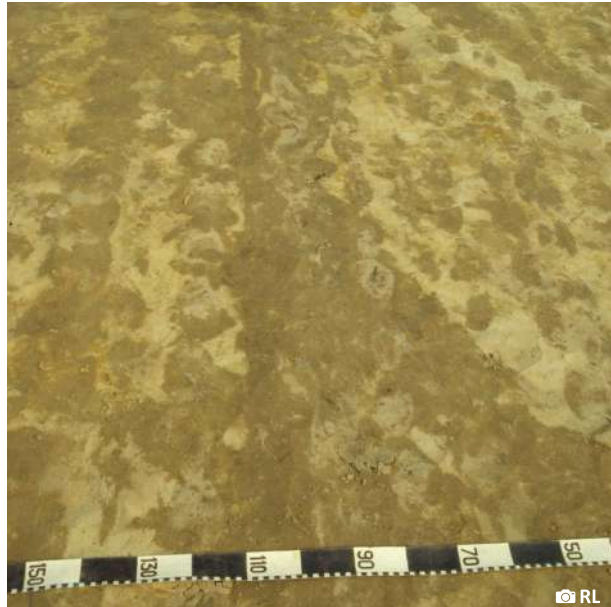
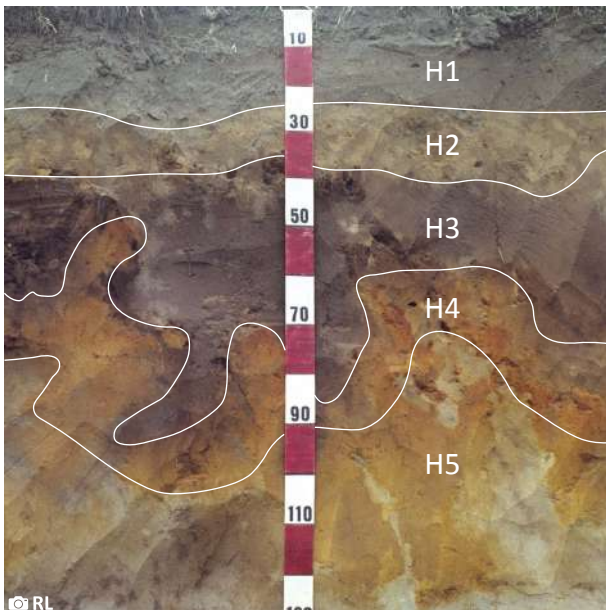


Fig. P44-P45: Sporen van diepspitten op de site van Aalter Woestijne, provincie Oost-Vlaanderen, België (zie fig. P43).



H1: 0-25 cm: Ap; huidige ploeglaag.

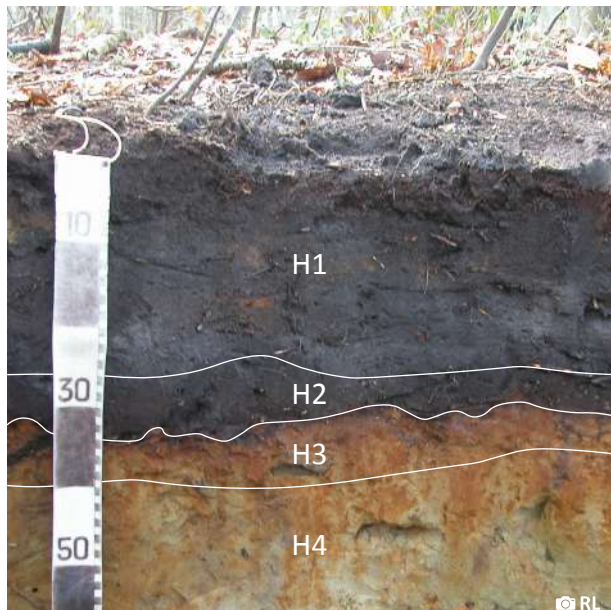
H2: 25-40 cm: E; restant van de podzol uitlogingshorizont.

H3: 40-47/93 cm: Bh; restant van de podzol humusaanrijkingshorizont, niet meer gecementeerd.

H4: 47/93-72/104 cm: Bsm(l); overblijfsel van de podzol ijzeraanrijking horizont, nog gecementeerd, plaatselijk (rechts) roestvlekken te wijten aan fluctuerende grondwatertafel.

H5: 72/104-113 cm: B.

Fig. P46: Postpodzol. Aalter, provincie Oost-Vlaanderen, België.



H1: 0-25 cm: Ap; bewerkingshorizont, de originele uitlogingshorizont is volledig verwerkt in de Ap.

H2: 25-35 cm: Bh; restant van de originele humusaanrijkingshorizont van de podzol en sterk gebioturbeerd.

H3: 35-40 cm: Bsl; ijzeraanrijkingshorizont met roestvlekken door een fluctuerende grondwatertafel.

H4: 40-55+ cm: Bl; kleiig zand met roestvlekken door een fluctuerende grondwatertafel.

Fig. P47: Postpodzol. Beernem, het Aanwij, provincie West-Vlaanderen, België.

Intensieve begrazing (weiden)

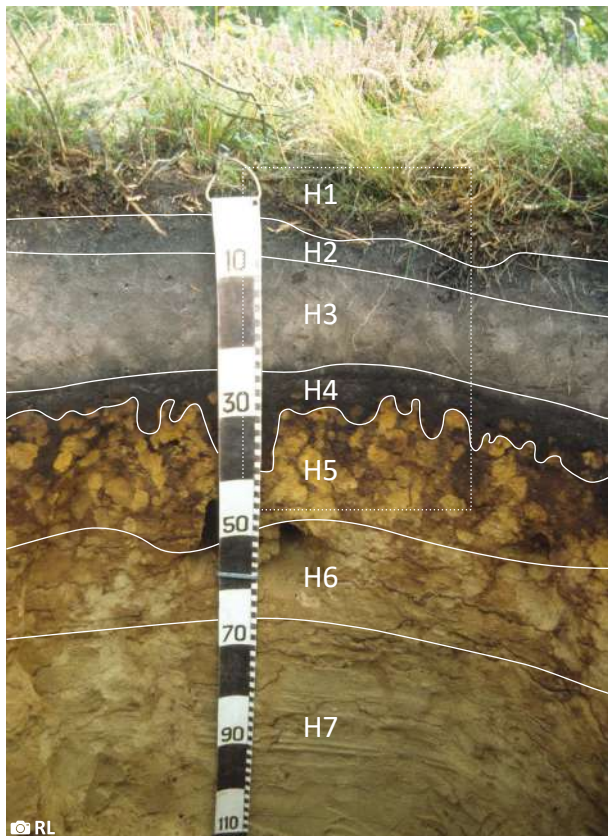
Op intensief begraasde weiden zal de microbiologische bodemactiviteit sterk toenemen door de belangrijke toevoer van excrementen en urine. Bovendien verandert de samenstelling van de bodemfauna zelf en komen er andere soorten in de bodem zoals regenwormen, mestkevers en mollen. Bij intense bodembioturbatie door dieren kunnen de podzolkenmerken mettertijd zelfs volledig verdwijnen (Gaucher, 1981: 605).

De natuurlijke vegetatie kan ook een rol spelen bij het ontstaan van postpodzolen. Een mooi voorbeeld komt van de Deense regio Jutland waar de humus-ijzerpodzol onder heide in enkele decennia volledig verdwenen is door de kolonisatie van eik (Nielsen *et al.*, 1987) (figuren P48-P55). Onder eeuwenlange heidevegetatie heeft er zich een humus-ijzerpodzol met een gecementeerde humus-ijzerhorizont ontwikkeld (figuren P48-P50). Wanneer de heidevegetatie wordt vervangen door een eikenbos, blijkt dat na 30 jaar de humus-ijzerhorizont niet langer gecementeerd is (figuren P51-P52). Na 70 jaar onder het eikenbestand is de humus-ijzerhorizont grotendeels verdwenen (figuren P53-P55).

In de Kempen duurde de extensieve begrazing van de heide op zandbodems veel langer dan in Oost- en West-Vlaanderen. Hierdoor komen in de Kempen de humus-ijzerpodzolen nog veel voor. De intensieve landbouw bleef beperkt tot de akkers in de nabijheid van de dorpen en boerderijen, met toepassing van een bemestingstechniek met plaggen. Heide- en bosstrooisel, humusrijke zoden van de heide- en grasvegetatie en ook van bossen en moerassen werden samen met een hoeveelheid zand, in de stal gebracht. Het vee vertrappelde het strooisel en de zoden, de aarde werd vermengd met de urine en uitwerpselen van het vee. Na een tijd werd deze mest, die een belangrijk deel minerale grond bevatte, terug op de akker gebracht. Hierdoor steeg geleidelijk het oppervlak van deze bodems met de ontwikkeling van een bijzonder dikke humusrijke horizont. Deze bodems worden **plaggenbodems** genoemd. Plaatselijk kan er zich onder de de plaggen A-horizont nog een restant van de originele podzolbodem bevinden (zie thema 'Erosie en sedimentatie'). Op de Bodemkaart van België krijgen deze bodems het symbool 'm' als profielontwikkeling.

Bodemevolutie door een wijziging in vegetatie - Hjerl Hede, Noord-Jutland, Denemarken (figuren P48-P55) (Nielsen *et al.*, 1987)

Fig. P48: Op de voorgrond een goed ontwikkelde heide die geleidelijk aan gekoloniseerd wordt door eik (achtergrond).



H1: +2-0 cm: Oi (ter hoogte van het meetlint).

H2: 0/9-6/16 cm: A.

H3: 6/16-23/30 cm: E.

H4: 23/30-27/38 cm: Bhm; gecementeerd zand.

H5: 27/38-47/52 cm: B(h)sm; gecementeerde horizont met talrijke gele vlekken van microbiologische activiteit die de organische stof aantast. De input van stikstof afkomstig van intensieve bemesting van het nabije akkerareaal, activeert de microbiologische activiteit zodat de organische stof gedeeltelijk verteerd wordt.

H6: 47/52-67/80 cm: Bs.

H7: 67/80-110+ cm: C; gestratificeerd zand.



Fig. P49-P50: De humus-ijzerpodzol ontwikkeld onder de heide.



Fig. P51-P52: Onder eikenbestand, 30 jaar oud. De Bh- en Bs-horizonten zijn niet meer gecementeerd. De overgang tussen de uitlogingshorizont (E) en de Bh is minder scherp.



Fig. P53-P55: Twee profielen van een Postpodzol onder een 70 jaar oud eikenbestand. Ter hoogte van de vroegere Bh- en Bs-horizonten die nu bijna verdwenen zijn, zijn de beworteling en de biologische activiteit sterk toegenomen.

3.6. Samenvatting van de bodemevolutie in de zandstreek

Goed gedraineerde bodems – geen watertafel in het profiel

Aan het **einde van de laatste ijstijd, het Weichseliaan**, werden tussen ongeveer 22.000 en 15.000 BP, pleniglaciale dekzanden en löss afgezet door de wind. Deze zanden bevatten enkele procenten leem en klei en ongeveer 10 % kalk (figuur P56: P1). Er ontstond een duinlandschap met talrijke gesloten depressies. Het landschap was begroeid met een korte toendravegetatie. Er was geen bodemgenese behalve het vormen van periglaciale *hummocks*.

Rond 14.650 BP begon het **Laatglaciaal**: dit was het einde van een uitgesproken droog periglaciaal klimaat en van eolische afzettingen van zowel dekzanden als löss. Het bodemoppervlak stabiliseerde en de bodemgenese ging van start. (De chronostratigrafische en geochronologische tabel is voorgesteld op het einde van het thema 'Voorbereiden en uitvoeren van aardkundig onderzoek').

Het Laatglaciaal wordt gekenmerkt door een opeenvolging van koudere stadialen en warmere interstadialen. Tussen 14.650-12.850 BP is er een opeenvolging van:

- Bølling interstadiaal: temperatuurstijging en belangrijke precipitatie,
- Oude Dryas stadiaal: korte, iets koudere periode,
- Allerød interstadiaal: temperatuurstijging en belangrijke precipitatie.

De **Bølling en de Allerød interstadialen** zijn belangrijk voor de bodemgenese. De temperatuur is voldoende gestegen voor de ontwikkeling van een boreaal bos. Het klimaat is te vergelijken met het huidige klimaat van Noorwegen en Zweden. In de winter is er een belangrijk sneeuwdek dat in lente dooit, wat een hoge input van koud water veroorzaakt. Dit heeft een sterke oplossing van kalk tot gevolg. Door de hoge neerslag ontstaan er in de gesloten depressies van het duinlandschap talrijke vijvers en meren. Plaatselijk is er, door kalkuitloging vanuit het hoger gelegen duinlandschap, kalk in deze meren afgezet zoals bijvoorbeeld in de Moervaartdepressie.

Op de duinen ontwikkelt er zich een oppervlaktehorizont aangerijkt met humus en een structuur B-horizont (Bw) gebonden aan sterke biologische

activiteit. Wanneer de bodem een $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ waarde tussen 5,5- 6,5 bereikt, begint het beetje klei aanwezig in deze dekzanden, te dispergeren en te migreren met als gevolg de ontwikkeling van klei-aanrijdingsbandjes (E/Bt) dieper in het bodemprofiel. Dit leidt tot de vorming van de horizontsequentie A-Bw-(E/Bt)n-C profiel ((E/Bt)n betekent een opeenvolging van de verschillende E/Bt-bandjes) (figuur P56: P2) (zie thema 'Organische en minerale (klei) colloïdenmigratie'). Ongestoorde zandbodems van Bølling en Allerød perioden komen vandaag slechts zeer plaatselijk voor, bedolven door duinen van latere zandafzettingen. Een uitzondering hierop zijn begraven aquatische vijver- en meerbodems gelegen in toenmalige depressies (Usselo-bodem).

Na het Allerød interstadiaal volgt het stadiaal van de **Jonge Dryas** (12.850-11.650 BP), de laatste fase van het Laatglaciaal. Het klimaat koelt plots sterk af, het is zeer koud met perioden van ontwikkeling van permafrost en afwisselend vochtige en droge perioden. In de zandstreek is het vegetatiedek discontinu en is het bodemoppervlak sterk onderhevig aan winderosie (figuur P56: P3). Er treedt uitgestrekte deflatie (wegvoeren van materiaal door de wind) en duinmigratie op: een nieuw duinlandschap wordt gevormd met zand zonder klei- noch leembijmenging (figuur P56: P3). De meeste vijvers en meren worden gedeeltelijk gevuld met zand dat de aquatische bodem begraaft (Usselo-bodem). Door de winderosie blijft er op het deflatievlak een grovere zandfractie en plaatselijk blijven er zelfs fijne keitjes achter (erosievloer). Op vele plaatsen stopt de bodemdeflatie ter hoogte van de klei-aanrijingsstructuren. Op het deflatievlak ligt er nu een nieuwe gestratificeerde zandlaag, dit zijn de laatglaciale dekzanden (figuur P56: P3).

De impact van de permafrost is plaatselijk zichtbaar ter hoogte van de klei-aanrijingshorizont met de ontwikkeling van licht gekleurde tongen, dit is de zogezegde 'degradatie' van de Bt-horizont die vooral een fysisch proces is. Als gevolg van de permafrost treedt er plaatselijk bodemverdichting op met de ontwikkeling van een fragipan (zie thema 'Periglaciale processen en kryoturbatie'). Ongestoorde bodems van deze fase komen vandaag niet meer voor.

Na de laatste koude periode van de Jonge Dryas begint het **Holocene interglaciaal** (11.650 BP – tot nu). De temperatuur stijgt plots, het vegetatiedek wordt continu en een nieuwe bodemgenese begint. Er ontwikkelt zich een humusrijke oppervlaktehori-

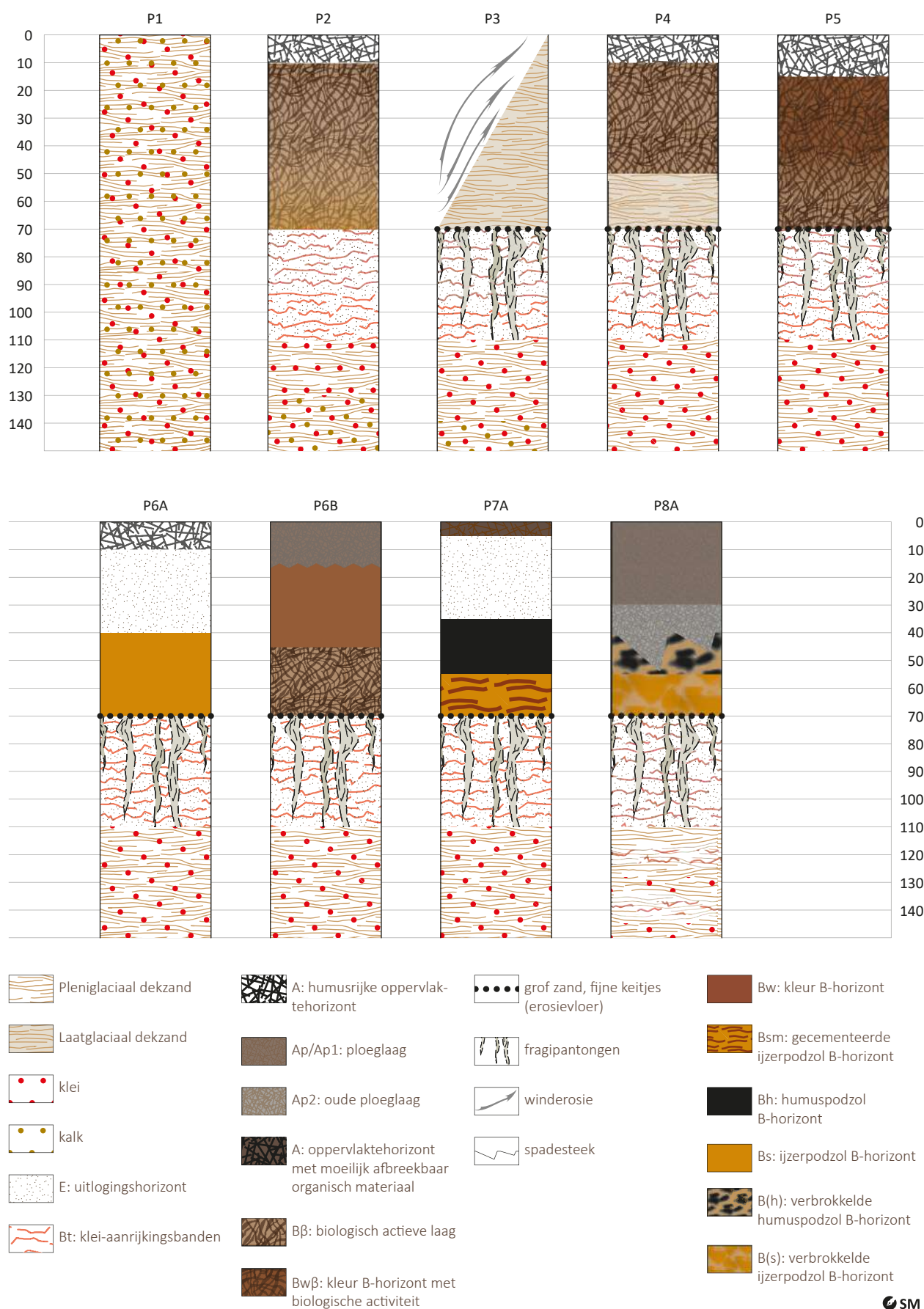


Fig. P56: Overzicht van de bodemevolutie in zandig Vlaanderen. (bron: R. Langohr).

zont en een structuur B-horizont gebonden aan intense biologische activiteit (figuur P56: P4). Door de hoge dichtheid van de klei-aanrijkingshorizont en de fragipanontwikkeling van de Jonge Dryas, blijft vanaf dit niveau de doorworteling eerder beperkt. De ontkalking gaat verder in de diepte. Deze bodems zijn vandaag nog te zien, begraven onder het holoceen veen en/of de latere kleiige polderafzettingen (Louwagie & Langohr, 2005; Allemeersch *et al.*, 2023).

In het begin van het Holoceen kon er een lichtbruine kleur-B-horizont ontwikkelen. Het ijzer van deze horizont is afkomstig uit de strooisellaag. Dit ijzer komt oorspronkelijk uit de diepere bodemlagen: de planten nemen met hun wortels water en mineralen op en transporteren deze naar de bladeren, die na afsterven de strooisellaag vormen. In de diepte gaat de ontkalking verder door (figuur P56: P5).

Tijdens een verdere fase van het Holoceen, onder gemengd loofbos en vóór de bosontginning voor landbouw, wordt er een E-Bs sequentie van een **bospodzol of ijzerpodzol** gevormd. De bruinoranje Bs-horizont stopt ter hoogte van het vroegere deflatieoppervlak. Deze Bs-horizont bevat ook organische stof, maar deze is kleurloos (figuur P56: P6A). In de zandstreek kan men deze bodems nog terugvinden onder bijvoorbeeld *tumuli* (Scheys, 1963) en aarden wallen uit de ijzertijd (Fourny & Van Assche, 1988). Op de Belgische Bodemkaart wordt dit een **'bodem met zwakke humus- en/of ijzer-B horizont'** genoemd, aangeduid met het symbool 'f' voor profielontwikkeling (Zbf bodems).

Langzamerhand werd in het neolithicum en de bronstijd de impact van de mens op het landschap groter, eerst door het openmaken van het bosrijke landschap om gemakkelijker te kunnen jagen, later door het toepassen van zwerflandbouw met kappen en branden, nog later door het land meer permanent te bewerken en veeteelt toe te passen. De oudste cultuurgronden worden gekenmerkt door de ontwikkeling van een al dan niet duidelijke bruine B- of kleur B-horizont. Dit wordt bij de Belgische bodemkartering een **'bodem met structuur of met weinig duidelijke kleur B-horizont'** genoemd en aangeduid met het symbool 'b' voor profielontwikkeling (Zbb bodems) (zie figuur P56-6B).

Elders degenereerde het oorspronkelijke bos en kwam er heide in de plaats. Dit had een belangrijke impact op de bodemgenese. Zwarte orga-

no-metaalcomplexen migreren tot op de vroegere ijzeraccumulatie-horizont (Bs). Onder de E-horizont ontwikkelt er zich zo een zwartbruine Bh- bovenop een roestbruine Bs-horizont. Dit noemt men een **humus-ijzerpodzol** waarvan de Bh en Bs plaatselijk kan gecementeerd zijn. Volgens de Belgische bodemkaart is dit een **'bodem met een duidelijke humus en/of ijzer B-horizont'** aangeduid met het symbool 'g' voor profielontwikkeling (Zbg bodems) (zie figuur P56-7A). De Bodemkaart gaf zo prioriteit aan de podzolontwikkeling t.o.v. de diepere Bt horizont. Een dergelijke bodem, met een successie van twee B-horizonten die ontwikkeld zijn door twee verschillende bodemvormende processen, noemt men een **polysequembodem**.

De bodem wordt plaatselijk steeds meer intensief bewerkt door (diep)spitten, ploegen, nivelleren, bemesten en inzaaien van planten die stikstof kunnen fixeren. Hierdoor worden de bovenste horizonten met elkaar gemengd. De bodem wordt bekalkt en bemest waardoor de bodemfauna terugkeert. De biologische activiteit breekt de restanten van de Bhs- en Bs-horizont verder af. Dit bodemtype noemt men een **postpodzol** en komt het meeste voor in zandig Vlaanderen. De Belgische bodemkartering duidt deze bodem aan als een **'bodem met een verbrokkelde humus en/of ijzer B-horizont'** met het symbool 'h' voor profielontwikkeling (Zbh bodems) (zie figuur P56-8A).

Bodems met fluctuerende grondwatertafel

Door de afwisseling van oxidatie- en reductie condities vormen er zich roestvlekken en licht gekleurde vlekken. Deze morfologie is vooral uitgesproken in de Bs- en de E/Bt-horizonten. Plaatselijk zijn de roestvlekken gecementeerd. Het horizontsymbool voor de horizonten met roestvlekken wordt aangevuld met het symbool 'g', met horizontensequentie A-E-Bsg-E/Bt-C.

3.7. Micropodzolen

In de literatuur over bodems onder bos en met een fijnere textuur, zoals leembodems, komt soms de term '**micropodzol**' voor (Louis, 1955). Deze bodems zijn erg zuur en de oplosbare organische stoffen die vrijkomen bij de humusvertering kunnen een beetje

migreren. Onder de oppervlakkige humushorizont kunnen deze stoffen neerslaan. In zandbodems is de aanrijkhingshorizont bruingrijs van kleur onder een lichtgrijze uitlogingshorizont. In leembodems bestaat de micropodzol uit een lichtpaars gekleurde aanrijkhingshorizont onder een dunne lichtgrijze tot witte uitlogingshorizont (figuren P57-P62).

Natuurlijk ontwikkelde micropodzol (figuren P57-P62)



- H1-H3: +9-0 cm: O; mor humustype.
- H1: Oi; licht verteerde humuslaag.
 - H2: Oe; gedeeltelijk verteerde humuslaag.
 - H3: Oa/Ah; sterk verteerde humuslaag die overgaat in een dunne humusrijke minerale horizont.
- H4-H5: 0-17 cm: micropodzol.
- H4: 0-4 cm: E; licht gekleurde uitlogingshorizont.
 - H5: 4-17 cm: Bhs; podzol humus-ijzeraanrijkhingshorizont.
- H6: 17-19 cm: Egh; dunne horizont, gereduceerd door waterstagnatie en humusaanrijking, omdat wortels moeilijk dieper kunnen groeien.
- H7: 19-31+ cm: 2C; lithologische discontinuïteit.

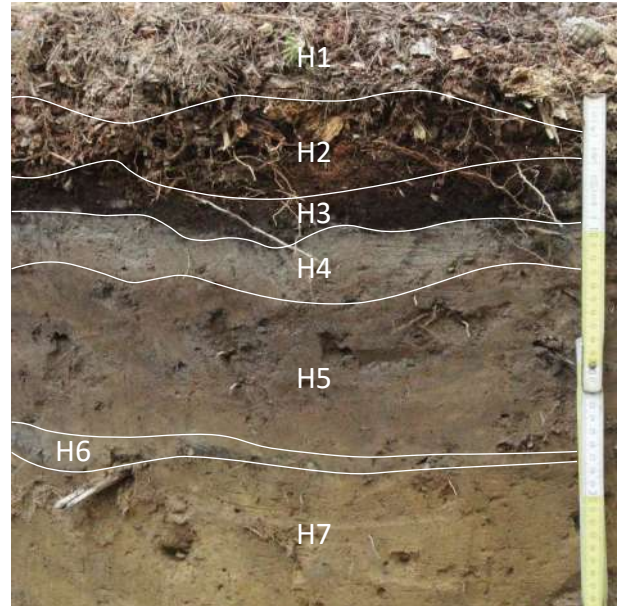
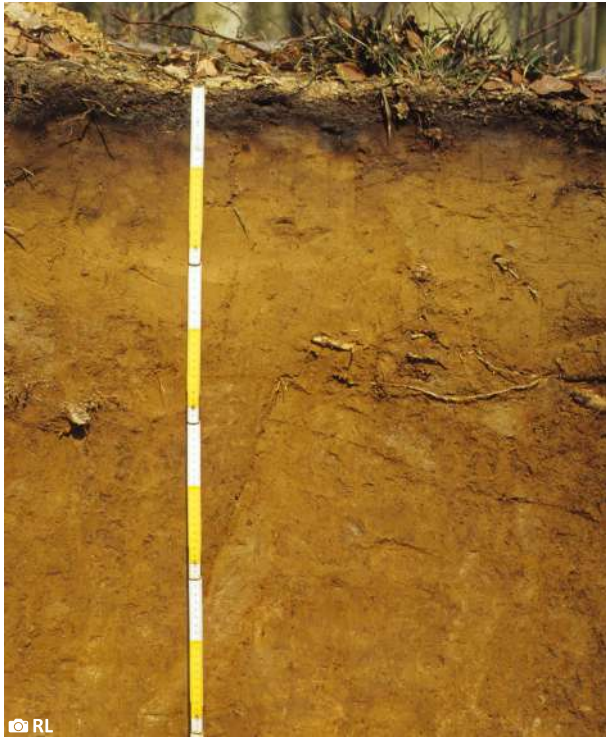


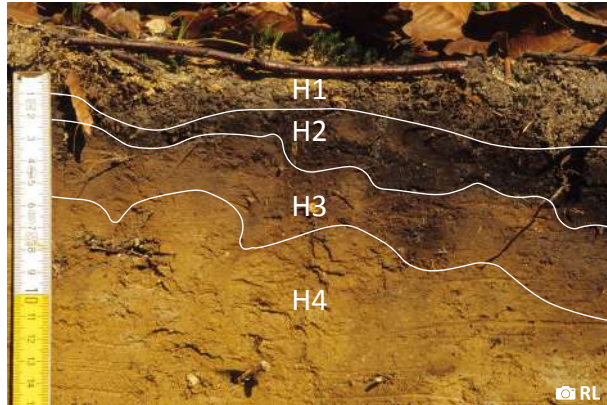
Fig. P57-P58: Natuurlijk ontwikkelde micropodzol in zandig materiaal. Een Keltische gracht gedeeltelijk gevuld met zand. Links: algemeen zicht. Rechts: detail van het profiel. Kolisbos, Neerpelt, provincie Limburg, België. (Langohr & Nicosia, 2015).



Fig. P59-P60: Natuurlijk ontwikkelde micropodzol in ontkalkte kustduinzanden. Nederland.



Dikwijls wordt onder een micropodzol een opeenvolging verstaan van horizonten die telkens maar enkele centimeters dik zijn: een oppervlakkige zwarte humushorizont (A-horizont), gevolgd door een lichter gekleurde uitlogingshorizont (E-horizont) en ten slotte een humus-ijzeraanrijkingshorizont (Bhs-horizont).



H1: +2-0 cm: Oi; strooisellaag.

H2: 0-2/5 cm: Ah; zwarte oppervlaktehorizont.

H3: 2/5-3/9 cm: Bhs; aanrijkingshorizont van micropodzol met een lichtbruine kleur en paarse tint.

H4: 3/9-11 cm: B.

Fig. P61-P62: Natuurlijk ontwikkelde micropodzol, lemig faciës onder een 130 jaar oud beukenbestand. Zoniënwoud, Ukkel, België.

Pseudomicropodzol (figuren P63-P64, P65-P67, P68-P70)

Sommige bodems echter vertonen een gelijkaardige morfologie als de micropodzol, maar hun vorming is te wijten aan oxido-reductieprocessen. Onderzoek van de bodems onder de beukenbestanden van het Zoniënwoud heeft ondertussen uitgewezen dat deze bodems eerder gevormd zijn door een oppervlakkige reductie van ijzer, omdat er tijdelijk water op een verdichte bodem stagneerde (figuren P63, P67, P80-P82). Deze vorm van gley noemt men een **stagnogley**. De oppervlakkige verdichting is ontstaan tijdens bosontginning en recreatie met vooral paarden (Verboven, 1982; Herbauts *et al.*, 1996, 1998).



Fig. P63-P64: Onder een dicht beukenbestand groeit meestal geen kruidenvegetatie, vandaar de naam 'naakt beukenbestand'. Op de plaats van het profiel groeide er wel een grasvegetatie van gladde witbol (*Holcus mollis*). Het bodemprofiel vertoont hier wat men vroeger een 'micropodzol' noemde (Louis, 1955) met een zwak ontwikkelde uitlogingshorizont en een ijzeraanrijdingsbandje (pijl). Tussen 6 tot 15 cm diepte is deze bodem echter sterk verdicht wat tijdens natte periodes de wortelgroei beperkt en waterstagnatie veroorzaakt. Zoniën-woud, Ukkel, België. (Verboven, 1982).

Interpretatie: Het profiel is geen micropodzol maar een stagnogley. De waterverzadiging wordt veroorzaakt door een *traffic pan*, een vorm van bodemverdichting die te wijten is aan menselijke activiteiten.



Fig. P65: Links: stroken van Waterpeper (*Polygonum hydropiper*), een plant die groeit op natte en stikstofrijke bodems. Deze stroken zijn te wijten aan paardenbetreding. De scherpe grens tussen de al dan niet begroeide bodem is een bewijs dat de groei onder het beukenbestand grotendeels verband houdt met de waterfactor en niet het licht. Zoniën-woud, Ukkel, België.

P66: Oppervlakkige waterstagnatie in de winter.

P67: Het profiel heeft een sterk verdichte bodem tussen 5 en 20/25 cm diepte (*traffic pan*) met een uitgesproken reductie door gebrek aan zuurstof en ijzerausloging. De planten die op dergelijke bodem groeien noemt men 'tredvegetatie'.



Fig. P68, P69-P70 (details): Beukenbestand in het Zoniënwoud. Fig. P68: Algemeen zicht van een zone met vroegere bodembetreding door bosontginning (tussen stippellijnen) Rechts van deze zone een profiel buiten de sterk verdichte zone.

Fig. P69 (links): Profiel met een sterk ontwikkelde *traffic pan* en een stagnogley (=stagnerend water). IJzer wordt in zuurstofloze omstandigheden oplosbaar en migreert tot een zone met meer open poriën en zuurstof. Het ijzer oxideert en slaat neer onder de vorm van een ijzerbandje. De bodem is zeer compact en de mate van reductie is indicatief voor de duur van stagnatie van het oppervlaktewater.

Fig. P70 (rechts): In deze zone is de *traffic pan* en de stagnogley veel minder ontwikkeld. Zoniënwoud, Ukkel, België.



Interpretatie:

1. In het Zoniënwoud is oppervlakkige bodemverdichting door betreding zeer verspreid. Als de verdichting gering is, groeit er weinig of geen vegetatie (fig. P70); is de verdichting sterk (fig. P69) dan blijft er voldoende water stagneren in het bovenste deel van de bodem voor de groei van een tredvegetatie.
2. Het grootste deel van het bodemlandschap van het Zoniënwoud is weinig aangetast door menselijke invloed (nooit gerooid voor landbouw) en de bodems zijn er uitzonderlijk goed bewaard. Voor leembodems is dit een unicum in het Atlantisch gebied van West-Europa. Oppervlakkige bodemverdichting door de mens, vooral het gevolg van bosontginning en recreatie, is daarentegen in het Zoniënwoud een wijd verspreid bodemkenmerk.

3.8. De placic horizont

De **placic** horizont is een golvend korstje van enkele millimeters dik dat vooral voorkomt in de aanrijkingshorizont van humus-ijzerpodzolen (figuren P71-P76). Dit kenmerk is niet opgenomen in de legende van de Bodemkaart van België, maar het is wel een diagnostisch kenmerk in de Amerikaanse (*diagnostic subsurface horizon*) en de World Reference Base (*qualifier*) bodemclassificatiesystemen

(Soil Survey Staff, 2010) (IUSS Working Group WRB, 2014).

De placic horizont komt vooral voor ter hoogte van de ondergrens van de Bh-horizont, vertraagt de waterpercolatie en verhindert de wortelpenetratie.

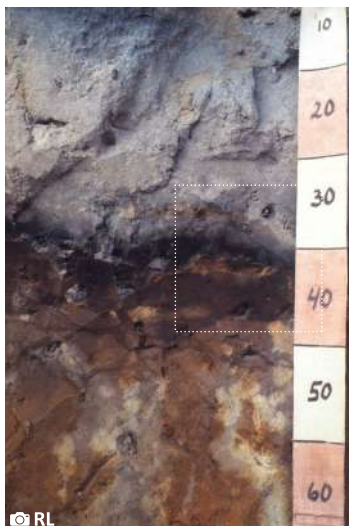


Fig. P71-P74: Korstje van enkele millimeters dik gevormd door de neerslag van ijzer, mangaan en organische stof op de grens van de Bh- en de Bs- horizont. Deze horizont beperkt sterk de waterpercolatie en de wortelontwikkeling. Kempen, provincie Antwerpen, België.



Fig. P75-P76: Bandje van enkele millimeters dik (witte pijlen) gevormd door de neerslag van ijzer, mangaan en organische stof op de grens van de Bh- en Bs-horizont. Deze placic horizon beperkt sterk de waterpercolatie en de wortelontwikkeling. De Bs-horizont is gecementeerd. Beernem, het Aanwils, provincie West-Vlaanderen, België. (Ampe & Langohr, 2006).

De placic horizon/*qualifier*, is een gecementeerd laagje veroorzaakt door een neerslag van ijzer al dan niet in combinatie met andere cementerende stoffen zoals humus of mangaan (Schaetzl & Thompson, 2015: 422, 423). De aanwezigheid van ijzer en eventueel mangaan wijst op een migratie en neerslag te wijten aan waterverzadiging. Mangaan wordt net als ijzer oplosbaar in een anaeroob milieu. Vreemd genoeg komt deze horizon ook voor op sites die vandaag goed gedraineerd zijn (figuren P71, P72). Vermoedelijk is de placic horizon een relict uit het Atlanticum (8.600-4.000 BP) (zie thema 'Vorbereiden en uitvoeren van aardkundig onderzoek'). Deze periode was iets warmer en vochtiger dan vandaag waardoor de oppervlaktebodem tijdens lange perioden waterverzadigd was (Roberts, 2014:159). In bodems gelegen in een (micro)depressie is het niet uitgesloten dat er ontwikkeling van veen was, wat wijst op een plaatselijke permanente waterverzadiging.

Alhoewel in de leembodems van het Zoniënwoud, die nooit verstoord werden door landbouw, de placic horizon ontbreekt, heeft men in depressies met een stagnogley op het plateau goed bewaarde pollen van *Sphagnum* mos aangetroffen. De pollenanalyses tonen aan dat er tijdens het Holoceen milieucondities met waterverzadiging aanwezig waren in het Zoniënbos (Langohr, 2016).

3.9. Izeroer (oerijzer, moerasijzer)

In de valleien van de Grote en Kleine Nete en de Demer kan men een bodemtoposequentie aantreffen van droge podzolbodems tot (zeer) natte moerasijzerafzettingen. Dit moerasijzer kan tot 27 % ijzer bevatten (Dreesen, 1999). In het verleden werd het moerasijzer, waar het voldoende grote volumes innam en het ijzergehalte voldoende hoog was, ontgonnen (figuur P81) en gebruikt als ijzererts. Waar men de dikste banken aantrof, werd het moerasijzererts als bouw materiaal aangewend (Landuydt & Bos, 1990). Deze ijzerertsen komen voornamelijk voor in de Kempense beekdalen waar ze omgeven zijn door bodems ontwikkeld in een soms dunne dekzandlaag waaronder een dik pakket van glauconietzanden ligt (glauconiet is een olijfgroen mineraal dat veel ijzer bevat). Het ijzer is enerzijds afkomstig uit de verwerking van glauconiethoudend zand en ijzerhoudende zandsteen van onder andere de Formatie van Diest (Gullentops, 1996: 89) en wordt met de grondwaterstromingen naar de valleien aangevoerd. Anderzijds speelt de migratie van ijzer uit de podzolbodem een rol in de vorming van moerasijzer.

In functie van de landschapspositie en de diepte tot de tijdelijke en de permanente grondwatertafel zal de bodem zich anders ontwikkelen (figuur P77).

- Op de plateaupositie en het hogere deel van de helling zit de tijdelijke watertafel voldoende diep (blauwe gestippelde lijn). Op deze landschapsposities kan er zich een goed gedraineerde **humus-ijzerpodzol** met A-E-Bh-Bs sequentie ontwikkelen. Het regenwater percoleert (blauwe pijlen) doorheen de podzolbodem tot aan de gereduceerde C-horizont (Cr) en voedt zo de grondwaterstromingen die doorheen het glauconiethoudend tertiair substraat stromen (2Cr-horizont) (rode pijlen). In de Cr- en 2Cr-horizont reduceert het ijzer en wordt het met het ondiepe en diepe grondwater afgevoerd naar de vallei.
- Hellingafwaarts komt de tijdelijke en permanente watertafel dichterbij de oppervlakte (blauwe gestippelde en volle lijn). In deze imperfect gedraineerde bodem ontwikkelt er zich een **grondwaterpodzol** of een **humuspodzol** met een A-E-Bh horizont sequentie. Door reductie wordt ijzer mobiel en wordt dit uit het profiel naar het grondwater afgevoerd.
- Aan de voet van de helling en in de vallei komt de tijdelijke en de permanente watertafel nog dichterbij de oppervlakte zodat de ontwikkeling van een podzolbodem niet langer mogelijk is. Hier ontwikkelt er zich een bodem met oxido-reductie vlekken (Bl-horizont) bovenop een reductie-horizont (Cr).
- Waar het ijzerhoudende grondwater uittreedt, is er een aanrijking met ijzer in het bovenste deel van het profiel die zodanig intens kan zijn dat in extreme gevallen de horizont gecementeerd wordt (Aclm) en er dikke ijzeroerbanks gevormd worden. In de laagste delen van het landschap, als deze niet worden gedraineerd, kan er veen gevormd worden (H-horizont). Ijzer wordt nog steeds met de grondwaterstroming aangevoerd en de vorming van het **moerasijzer** gaat verder. Tijdens de wintermaanden zal het water net tot boven het maaiveld stijgen, in de zomer zakt het grondwater weinig weg. In oxiderende omstandigheden, bijvoorbeeld bij stromend zuurstofrijk water, het tijdelijk droogvallen van een depressie, het zakken van de grondwatertafel of in overstromingsgebieden van rivieren waar het water tot stilstand komt en verdampt, slaat het ijzer neer en wordt er moerasijzer gevormd. Dit moerasijzer was een bron van ijzererts en werd vroeger ontgonnen. Na de eerste wereldoorlog werd dit grotendeels stopgezet.

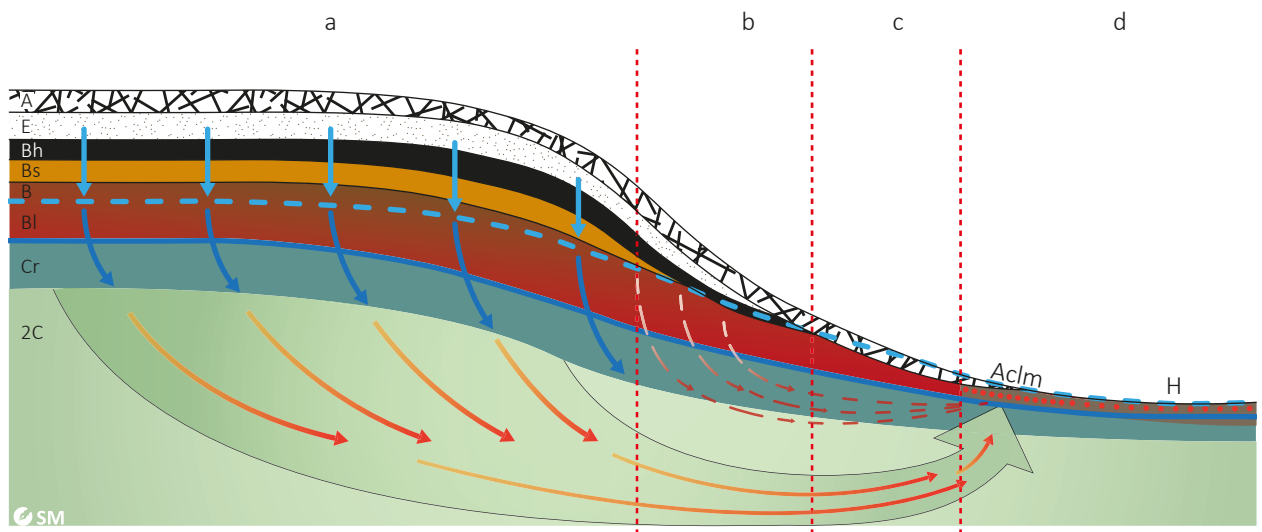


Fig. P77: Schematische voorstelling van bodemontwikkeling langs een topo-hydrosequentie gaande van een humus-ijzerpodzol op de hoogste landschapsposities tot moerasijzer in de valleien. (bron: R. Langohr).



Fig. P78-P79: Neerslag van moerasijzer bovenaan in het profiel in een niet gedraineerd moeras. Gereduceerd ijzer opgelost in het grondwater wordt ondergronds lateraal aangevoerd, oxideert en slaat neer in de oppervlaktehorizont door contact met de lucht en door bacteriële activiteit. Regio Hamburg, Duitsland.



Fig. P80: IJzeroerbanken verwijderd uit de percelen om akkers te kunnen aanleggen. Noorderwijk, Herentals, provincie Antwerpen, België.



Fig. P81: Het moerasijzer is voldoende gecementeerd om het te gebruiken voor de constructie van muren. Regio Hamburg, Duitsland.



H1-H3: 0-40 cm; colluvium, vandaag onder weide.

H4: 40-48/52 cm; restanten van moerasijzer.

H5-H6: 48/52-78+ cm; sterk gevlekte bodem, relict van een begraven moerasbodem.

Fig. P82: Initieel een natte moerasbodem, die begraven werd onder colluvium en vervolgens na drainage gebruikt werd voor landbouw. Sint-Gillis-Waas, provincie Oost-Vlaanderen, België.

4. Bodems met waterhardlaag

Waterhard is een zandige bodemhorizont waarin de poriën gevuld zijn met een licht grijsbruine, zeer oplosbare organische stof afkomstig uit een veenlaag (Koopman, 1986, 1988; Dekker *et al.*, 1991). Deze stof kan tot diep in het bodemprofiel doorsijpelen en zich afzetten op minder doorlaatbare bodemhorizonten (figuren P83, P84) of lagen met een iets fijnere textuur (figuren P34, P85-P92). De porositeit van de waterhardlaag neemt sterk af en de dichtheid neemt toe, wat de waterdoorlatendheid vermindert. Deze horizont is zeer compact en hard en heeft een hoge indringingsweerstand, zelfs wanneer ze verzadigd is met water. Vandaar de term 'waterhard'.

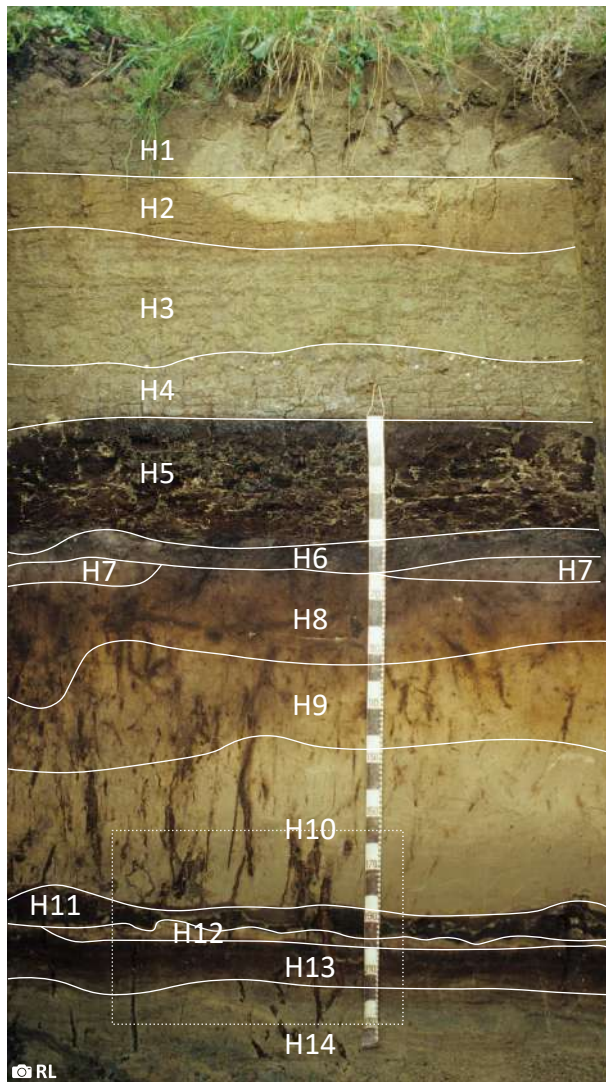


Fig. P83: Grondwaterpodzol en waterhardlagen onder veen met een mesolithische site (Crombé *et al.*, 1999; Bastiaens *et al.*, 2005). Verrebroek, Beveren, provincie Oost-Vlaanderen, België.

Op sites waar het veen verdwenen is door veenontginningen of door een daling van de grondwartertafel, waarbij het veen blootgesteld aan de lucht oxideert en afbreekt, getuigt zo'n horizont van een vroegere veenlaag (figuur P34). De organische stof bevat aluminium maar geen ijzer (Koopman, 1988) wat wijst op een kenmerk van grondwaterpodzolen.

Soms wordt ook de term '**doppleries**' vermeld. Dit is een zwarte amorfe organische stof bestaande uit organische zuren die, geassocieerd met veen, poriën en galerijen vult. Deze laag is voor het eerst beschreven door Döppler (1849) (Koopman, G., 1986; Feller *et al.*, 2010).

H1-H4: kleirijke historische polderafzettingen.

H5: holoceen veen.

H6-H9: grondwaterpodzol met A- (H6), E- (H7), Bh- (H8) en B-horizont (H9). Dit is het niveau van mesolithische occupatie.

H10-H12: moedermateriaal van laatglaciale dekzanden, met sporen van boomwortels die dateren van vóór de veenontwikkeling.

H11: waterhardafzetting (boven) op de oppervlakte A-horizont (onder) van laatglaciale bodem (Usselo-bodem?).

H12: dun bandje dekzand.

H13: grondwaterpodzol met A, E en Bh horizont (Usselo-bodem?).

H14: pleniglaciale dekzanden.



Fig. P84 (detail van P83): De pijlen tonen de waterhardlaag, een aanrijking van zeer oplosbare organische stof afkomstig van de voormalige oppervlakteveenlaag (0-50 cm) (H5). Deze stof vult alle poriën van het zand, zodat deze horizont een 'harde' consistentie krijgt en sterk ondoorlaatbaar wordt.

210 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



H1: polderklei die de veenontginning afdekt.

H2: rest van het ontgonnen veen.

H3: 0/8-18/25 cm: E; uitlogingshorizont van een grondwaterpodzol.

H4: 18/25-28/34 cm: Bh1; organische aanrijkingshorizont van grondwaterpodzol, zwak donkergrijs.

H5: 28/34-38/68 cm: Bh2; organische aanrijkingshorizont, intens donkergrijs.

H6: 38/68-57/75 cm: Bh3; organische aanrijkingshorizont, bruin gekleurd.

H7: 57/75-121/124: BC; dekzanden.

H8: 121/124-128/140: Bh4; aanrijking van waterhard afkomstig van de originele veenlaag.

H9: 128/140-155+ cm: C2; dekzanden met iets meer leem.

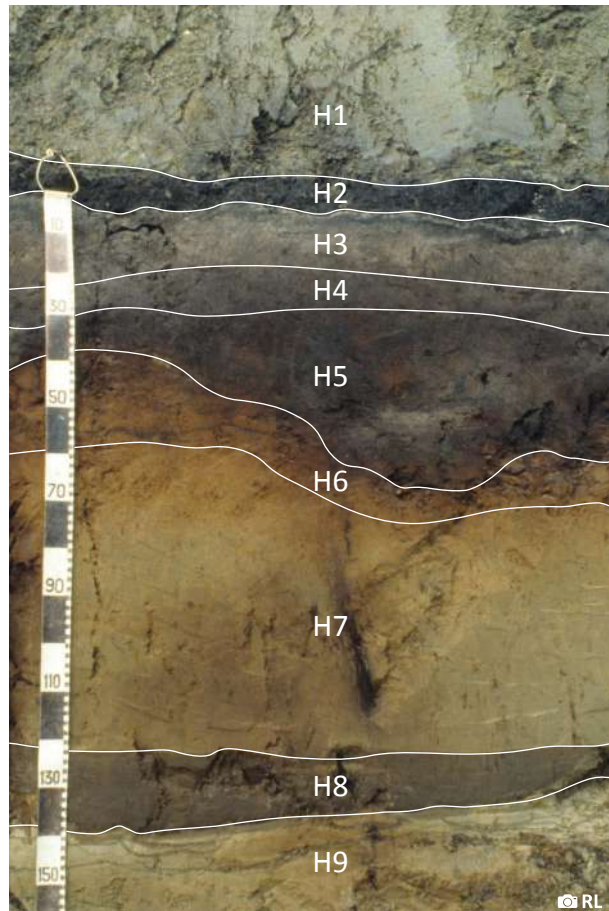


Fig. P85-P86: Algemeen zicht en detail van een begraven podzolbodem onder polderklei. Ramskapelle, provincie West-Vlaanderen. (Becze-Deák & Langohr, 2000).

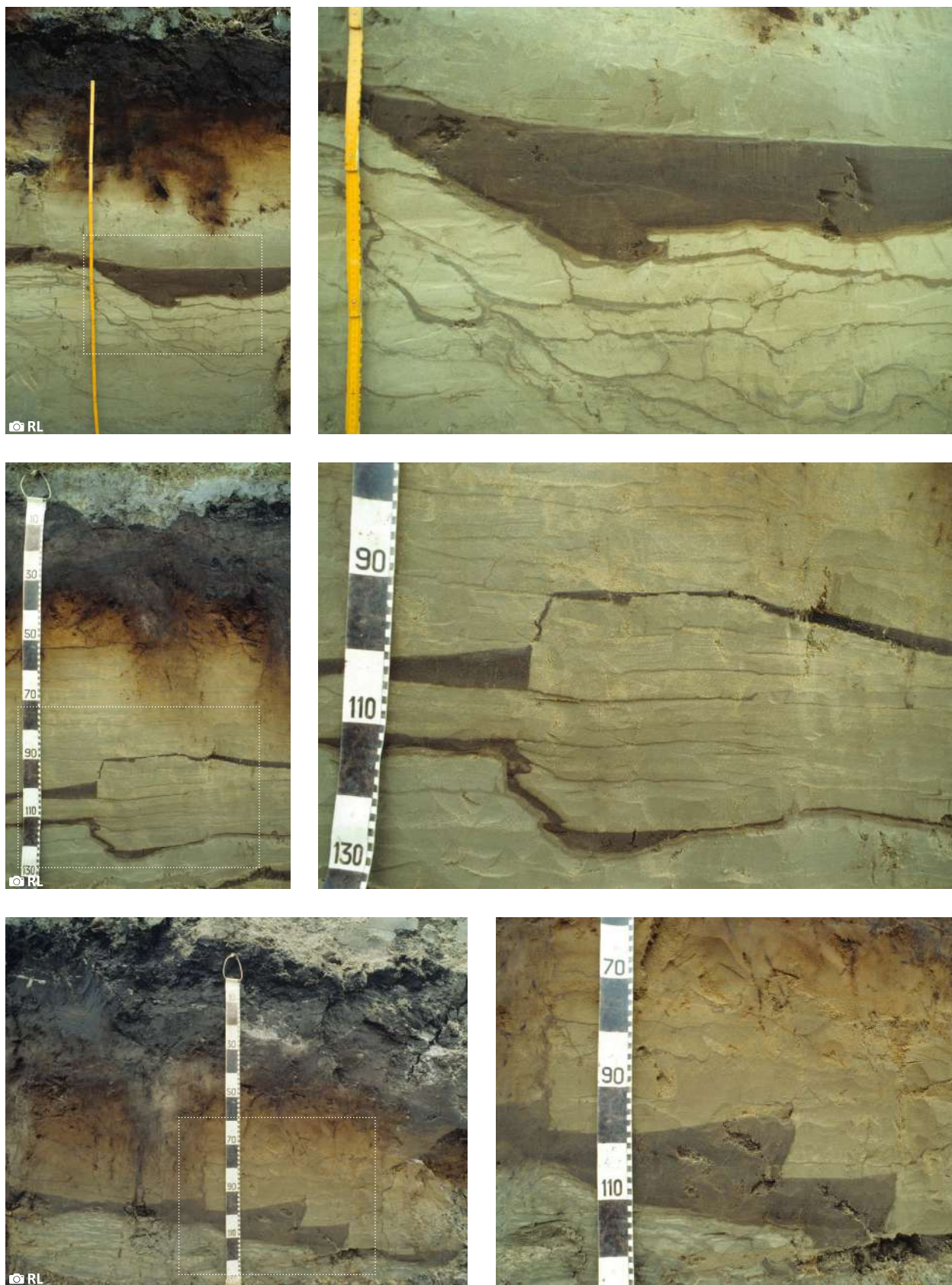


Fig. P87-P92: Variabiliteit van de waterhardlaag, telkens met detailfoto. Ramskapelle, provincie West-Vlaanderen, België.

REFERENTIES

- Allemeersch, L., Cruz, F., Germonpré, F., Laloo, P., Mikelsen H., J., Storme, A., Vergauwe, R., Verhegge, J. & Verwerft, D., 2023. *Veen als venster op het verleden. Een archeologisch syntheseonderzoek naar veen en de relatie met menselijke activiteiten in het oostelijk kustgebied van de prehistorie tot en met de Romeinse periode*. SYNTAR nr. 16, agentschap Onroerend Erfgoed, 195 pp.
- Ampe, C. & Langohr, R., 2006. Beernem – Het Aanwijs. Uitgewerkt voorbeeld erkenningsdossier Waardevolle Site voor Bodem. In: Project waardevolle bodems in Vlaanderen. Eindverslag. Ampe, C., Bosmans, E., Defrijn, S., Vancampenhout, K. & Wouters, K., 129-137. Vlaamse Overheid, Dienst Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen, 208 pp.
- Avril, P., 1961. *Texte explicatif de la planchette Saint-Hubert 195^f*. Carte des sols de la Belgique, Centre de Cartographie des Sols, 93 pp.
- Avril, P., 1971. *Texte explicatif de la planchette Grupont 195^W*. Carte des sols de la Belgique, Centre de Cartographie des Sols, 141 pp.
- Bastiaens, J., Crombé, Ph., Deforce, K., Ervynck, A., Gelorini, V., Klinck, B., Langohr, R., Lentacker, A., Louwagie, G., Meersschaert, L., Perdaen, Y., Sergeant, J., Van Neer, W., Van Strydonck, M., Verbruggen, C., 2005. In: *The Last Hunter-Gatherer-Fishermen in Sandy Flanders (NW-Belgium). The Verrebroek and Doel Excavation Projects. Volume 1: Palaeo-environment, chronology and features* (ed. Crombé, Ph.). With minor contributions from Bats, M., Cordemans, K., Craig, O., Van der Putten, N., Vrydaghs, L. Ghent University, Archaeological Reports 3. Ghent University, 334 pp.
- Becze-Deák, J. & Langohr, R., 2000. Podzolisation, peat development and dopplerite – soil characteristics of a challenging profile at the Ramskapelle Polder (West Flanders – Belgium). *Pedologie Themata*, 8, 113-121.
- Bourgeois, J., 1988. Enclos et nécropole du second âge du fer à Kemzeke (Stekene, Flandre orientale): rapport provisoire des fouilles 1988. *Scholae archaeologicae* 12, 41 pp.
- Crombé, Ph., Deforce, K., Langohr, R., Louwagie, G., Perdaen, Y., Sergeant, J. & Verbruggen, C., 1999. A small Final-Palaeolithic knapping site at the Verrebroek 'Dok 2' (Flanders, Belgium). *Notae Praehistoricae*, 19, 63-68.
- David, J., 1984. Spade cultivation in Flanders. *Tools and Tillage*, 5, 1, 3-12.
- Deckers, J., 1966. Contribution à l'étude de la composition et de la capacité de production des sols de l'Ardenne centrale et de la Famenne orientale. *Pedologie*, Mémoire 3, 293 pp.
- Dekker, L., Booij, A., Vroon, H. & Koopman, G., 1991. Waterhardlagen: indicatoren van een voormalig veendek. *Grondboor en Hamer*, 1991, 25-30.
- De Coninck, F., 1980. Major mechanisms in formation of spodic horizons. *Geoderma*, 24, 101-128.
- De Coninck, F., Langohr R., Embrechts, J. & Van Ranst E., 1986. The Belgian soil classification system under the microscope. *Pedologie*, 36, 235-261.
- Döppler, C., 1849. Ueber eine merkwürdige in Oesterreich aufgefundenen gelatinösen Substanz. *Sitz. K. Akad. Wiss. Wien*, 3, 239-240.
- Dreesen, T., 1999. IJzerwinning in de Kempen. *Utersjank* (Tijdschrift heemkundige kring Opoeteren), 16, 18-21.
- Edelman, C., 1960. Podzols forestiers et podzols de bruyère. *Pedologie*, 10, 229-249.
- Edelman, C., 1962. Bospodzolen en Heidepodzolen. *Boor en Spade*, 13, 51-60.
- Feller, C., Brossard, M., Chen, Y., Landa, E. & Trichet, J., 2010. Selected pioneering works on humus in soils and sediments during the 20th century: A retrospective look from the International Humic Substances Society view. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35, 903-910.
- Fourny, M. & Van Assche, M., 1988. Nouvelle fortification Hallstattienne dans le Bois de Hal. XLIX^e Congrès de la Fédération des Cercles d'Archéologie et d'Histoire de Belgique. Congrès de Namur, 18-21 VIII 1988, Actes, Tome I, 12-13.
- Gaucher, G., 1981. *Traité de pédologie agricole. Les facteurs de la pédogenèse*. G. Lelotte-Dison, Belgique, 730 pp.
- Gullentops, F., 1996. IJzerzandsteen. In: *Delfstoffen in Vlaanderen* (eds. Gullentops, F. & Wouters, L.), 88-89. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Brussel, 198 pp.
- Herbauts, J., El Bayad, J. & Gruber, W., 1996. Influence of logging traffic on the hydromorphic degradation of acid forest soils developed on loessic loam in middle Belgium. *Forest Ecology and Management*, 87, 193-207.
- Herbauts, J., El Bayad, J. & Gruber, W., 1998. L'Impact de l'exploitation forestière mécanisée sur la dégradation physique des sols: le cas des sols limoneux acides de la forêt de Soignes (Belgique). *Revue forestière française*, AgroParisTech, 1998, 50, 2, 124-136. ff10.4267/2042/5523ff. fhal-03443628.
- IUSS Working Group WRB, 2014. *World Reference Base for Soil Resources 2014*. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106, FAO, Rome, 181 pp.
- Koopman, G., 1986. Waterhard: wat het is en wat er hard aan is ... Doctoraal onderzoek Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde, Rijksuniversiteit Groningen, 104 pp.
- Koopman, G., 1988. 'Waterhard': A hard brown layer in sand below peat, The Netherlands. *Geoderma*, 42, 147-157.

- Lamberts, D. & Baeyens, L., 1963. IJzerpodzolen in de Kempen. *Pedologie*, 13, 25-37.
- Landuydt, C. & Bos, K., 1990. Een curiosum: moerasijzererts als bouwsteen. *Bull. Belg. Ver. Geologie*, 99-2, 159-165.
- Langohr, R., 2016. La Forêt de Soignes – Site unique pour les sciences de la terre et l'archéologie. Comprendre l'évolution du paysage pédologique dans la région des loess en Belgique. Le facteur édaphique dans l'écologie forestière. Un aperçu de 45 ans de recherche. Excursion 08 Juillet 2016, Association Française des Sols – Soil Science Society of Belgium, 29 pp.
- Langohr, R. & Nicosia, C., 2015. Neerpelt, Kolisbos Celtic Fields. Final report Archaeopedology. In: Een archeologische evaluatie en waardering van Celtic Fields in het Kolisbos (Neerpelt, provincie Limburg) (eds. Vanmontfort, B. et al.). Bijlage 6, 31 pp. Agentschap Onroerend Erfgoed. DOI: 10.13140/RG.2.2.33202.40642
- Lindemans, 1994. *Geschiedenis van de Landbouw*. Tweede uitgave. Genootschap voor Geschiedenis en Volkskunde. Antwerpen-Borgerhout. Deel 1, 472 pp; deel 2: 541 pp.
- Louis, A., 1955. Waarnemingen betreffende de degradatie der bosprofielen in het Zoniënwoud. *Natuurwetenschappelijk Tijdschrift*, 37, 113-118.
- Louwagie, G. & Langohr, R. 2005. Pedo-lithostratigraphical analysis. In: *The Last Hunter-Gatherer-Fishermen in Sandy Flanders (NW-Belgium). The Verrebroek and Doel Excavation Projects. Volume 1: Palaeo-environment, chronology and features* (Ed. Crombé, Ph.), 27-107. Archaeological Reports Ghent University 3, 334 pp.
- Mikkelsen, J., Cools, N., De Vos, B. & Langohr, R., 2007. Case studies on forest soil profile description and classification according to WRB-2006. Forest Soil Co-ordinating Centre, Geraardsbergen, Belgium, 83 pp.
- Mikkelsen, J., Ampe, C., Cools, N., Devos, Y., Dondeyne, S., Oorts, K., Pieters, M. & Langohr, R., 2022. Veldhandleiding voor het beschrijven van bodems bij archeologisch onderzoek in Vlaanderen. Handleidingen agentschap Onroerend Erfgoed 29, 80 pp.
- Nielsen, K., Dalsgaard, K. & Nørnberg, P., 1987. Effects on Soils of an Oak Invasion of a Calluna Heath, Denmark, I. Morphology and Chemistry. *Geoderma*, 41, 79-95.
- Pieters, M., 1990. Bemesting en aanverwante grondverbeterpraktijken archeologisch bekeken. *Archeologie* 1990, 5-9.
- Platteborze, A., 1970. *Texte explicatif de la planchette Wellin 194^E*. Carte des sols de la Belgique, Centre de Cartographie des Sols, 121 pp.
- Righi, D., Van Ranst, E., De Coninck, F. & Guillet, B., 1982. Microprobe study of a placohumod in the Antwerp Campine (N Belgium). *Pedologie*, 32, 117-134.
- Roberts, N., 2014. *The Holocene. An environmental history*. 3rd edition. Wiley Blackwell, 364 pp.
- Sanders, J., Sys, C. & Vandenhout, H., 1989. *Verklarende tekst bij het kaartblad Stekene 26E*. Bodemkaart van België, 141 pp.
- Schaetzl, R. & Thompson, M., 2015. *Soils, Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, 778 pp.
- Scheys, W., 1963. Podzolvorming belicht door archeologische waarnemingen. *Pedologie*, 13, 216-230.
- Soil Survey Staff, 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, 338 pp.
- Tavernier, R. & Ameryckx J., 1957. Le postpodzol en Flandre sablonneuse. *Pedologie*, 7, 89-96.
- Tavernier, R. & Smith, G., 1957. The concept of Braunerde (Brown Forest Soil) in Europe and the United States. *Advances in Agronomy*, 9, 217-289.
- Tomasso, S., Cnuts, D., Coppe, J., Geerts, F., Van Gils, M., De Bie, M. & Rots, V., 2021. A closer look at an eroded dune landscape: first functional insights into the Federmessergruppen site of Lommel-Maatheide. *Peer Community Journal, Section Archaeology*, 5, Volume 1, article e66.
- Van Ranst, E., 2001. Soil genesis. Lecture notes, International Interuniversity Post-Graduate Programmes. Physical land resources. UGent, 172 pp.
- Van Ranst, E. & Sys, C., 2000. *Eenduidige legende voor de digitale bodemkaart van Vlaanderen* (schaal 1/20.000). Universiteit Gent. Laboratorium voor Bodemkunde, 361 pp. <https://www.dov.vlaanderen.be/page/digitale-bodemkaart-van-het-vlaams-gewest>.
- Verboven, W., 1982. Verband tussen bodemkenmerken en de kruidlaag onder beukenbestanden in het westelijk deel van het Zoniënbos. Unpublished MSc. thesis, Ghent University, 49 pp.
- Vergauwe, R., 2012. Studie omtrent bodemgenese en degradatieprocessen bij bronstijd grafheuvels in het zuiden van de Lage Landen. Master thesis Archeologie, Universiteit Gent, 204 pp.
- Verhulst, A., 1964. *Het landschap in Vlaanderen in historisch perspectief*. De Nederlandse Boekhandel, Antwerpen, 128 pp.

Geraadpleegde websites op 10/09/2025

[http://www.uttersjank.be/files/IJzerwinning in de Kempen.pdf](http://www.uttersjank.be/files/IJzerwinning_in_de_Kempen.pdf)

<https://nl.wikipedia.org/wiki/IJzeroer>

IN DIALOOG MET BODEMS VELDBODEMKUNDE VOOR ARCHEOLOGISCH ONDERZOEK

PERIGLACIALE PROCESSEN EN KRYOTURBATIE

AUTEURS : ROGER LANGOHR
CAROLE AMPE
JARI HINSCH MIKKELSEN
SYLVIA MAZEREEL



1. Inleiding

1.1. Verspreiding van periglaciale processen

Een periglaciaal milieu betekent letterlijk ‘ nabij of rond de gletsjer’, maar de term verwijst naar een zone met een koud klimaat waar vorstactie een belangrijk proces is, ofwel door de breedteligging ofwel door de hoogteligging. **Periglaciale processen** worden gedomineerd door vorstactie, dit wil zeggen een afwisseling van vriezen en dooien van water in de bodem, gesteente en andere materialen. Periglaciale processen gaan dikwijls gepaard met **permafrost**: de temperatuur van de bodem is voor minstens twee opeenvolgende jaren lager dan 0 °C (Jones *et al.*, 2010: 20). Aan het oppervlak zijn sporen van periglaciale processen te zien onder de vorm van bijvoorbeeld een microreliëf van bulten en depressies, een polygonenpatroon, al dan niet gesorteerde steencirkels. In de bodem zijn sporen van **kryoturbatie** te zien. Dit is het bewegen van het bodemmateriaal door vorstactie met de vervorming van de oorspronkelijke bodemgelaagdheid tot gevolg, zoals verfrommelingen en de vorming van involuties met instulpingen en opwelvingen. In ruime betekenis omvatten kryoturbatie verschijnselen eveneens capping, gelifluctie, de vorming van vorstwiggen, ijswipgseudomorfen, fragipan ... Deze vormen en processen worden verder in dit hoofdstuk besproken. Periglaciale processen kunnen dus de bodem sterk verstoren wat een belangrijke invloed kan hebben op artefacten en archeologische structuren (e.g. Hilton, 2003).

Tegenwoordig komen de periglaciale processen/permafrost in Europa voor op het Scandinavisch Hoogland in Noorwegen, Zweden en Finland, op IJsland en Groenland en in de hooggebergten van de Alpen en de Pyreneeën (Jones *et al.*, 2010: 61, 116, 132, 133). Op het noordelijk halfrond zijn deze processen actief op ongeveer 24 % van het landoppervlak, gebieden onder ijskappen niet meegerekend (Jones, 2010: 20; Van Huissteden & Vandenberghe, 2022: 19). Permafrost bedekt ongeveer 60 % van Rusland, 50 % van Canada, 23 % van China en 90 % van Alaska.

Tijdens de laatste ijstijd, het Weichseliaan (zie § 1.4 - tabel G1), en meer specifiek tijdens het Vroeg- en het Pleniglaciaal (de periode van ongeveer 116.000 tot 14.650 BP) (Van Vliet-Lanoë & Lisitsyna, 2001),

lag België binnen de zone waar periglaciale processen actief waren. Deze processen werden opnieuw actief tijdens het Laatglaciaal (14.650 – 11.650 BP), met name tijdens de Jonge Dryas, de periode rond 12.850 - 11.650 BP op het einde van de Weichseliaan ijstijd. Artefacten die van deze periode dateren of die ouder zijn, kunnen dus kenmerken vertonen die wijzen op periglaciale processen. De kennis van deze processen kan vooral helpen bij het onderzoek op finaalpaleolithische en vroegmesolithische sites, omdat de eerste dateren van vóór en de tweede van na de Jonge Dryas periode.

Ook meer naar het zuiden zoals in Zuid-Frankrijk en mogelijk ook in Noord-Spanje kan men sporen van periglaciale processen/permafrost van de laatste ijstijd observeren (e.g. Frenzel *et al.*, 1992: 49, 53, 57; Andrieux *et al.*, 2016; Vandenberghe *et al.*, 2014). Vermoedelijk is de hele wereld voor ongeveer een derde van het landoppervlak, het noordelijk halfrond voor ongeveer de helft, ooit door periglaciale processen/permafrost beïnvloed (Pissart, 1987: 7; Vandenberghe *et al.*, 2014).

1.2. Specifieke eigenschappen van water

Water is een zeer belangrijk element voor periglaciale processen.

Water komt voor in drie fasen: vloeibaar (water), gas (damp) en vaste stof (ijs). Wanneer bij het omzetten van de ene fase naar de andere, energie aan de omgeving wordt onttrokken, spreekt men van een endotherme reactie. Wordt er energie aan de omgeving geleverd dan is de reactie exotherm (figuur G1).

Alle faseovergangen zijn mogelijk:

- IJs > water: smelten, dooien (endotherm),
- Water > ijs: bevriezen, stollen (exotherm),
- Water > damp: verdamping (endotherm),
- Damp > water: condenseren (exotherm),
- IJs > damp: sublimeren (endotherm),
- Damp > ijs: (ver)rijpen, desublimeren (exotherm).

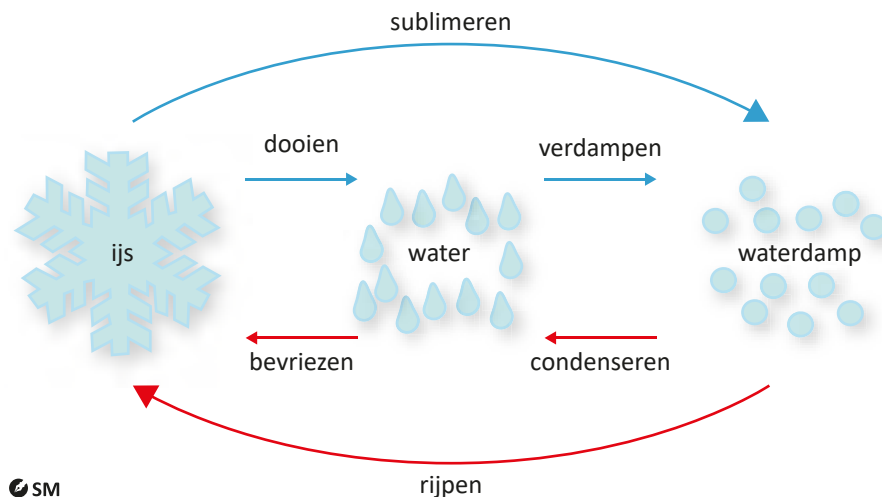


Fig. G1: Aggregatietoestanden of hoofdfasen van water. Exotherme reacties geven warmte af aan de omgeving (rode pijlen), de endotherme reactie onttrekken warmte aan de omgeving (blauwe pijlen).

Water bezit een uitzonderlijk **grote soortelijke warmte**, dit wil zeggen dat de hoeveelheid energie die nodig is om 1 liter water met 1 °Celsius (of 1 °Kelvin) te doen stijgen, groot is. De soortelijke warmte van water (vloeistof), bedraagt 4186 J/(kg.K). Ter vergelijking: voor brons is dit slechts 380 J/(kg.K). Er is dus veel meer energie nodig om de temperatuur van 1 kg water met 1 °C te verhogen dan voor 1 kg brons. Hetzelfde geldt bij de afkoeling van het water, dan komt er per afname van 1 °C meer energie vrij dan voor brons. Het verschil in soortelijke warmte uit zich in de bodem door het trager opwarmen en trager afkoelen of bevriezen van natte bodems.

Een watermolecule (H_2O) is een chemische verbinding tussen 2 waterstofatomen en 1 zuurstofatoom. Watermoleculen hebben een sterk **polair** karakter, dit wil zeggen dat hoewel de molecule op zich elektrisch neutraal is, de ladingsverdeling in de molecule niet gelijkmatig is, waardoor ze elkaar sterk aantrekken. Door deze eigenschap heeft water een **relatief laag smeltpunt**, een **hoog kookpunt** en een **hoge smelt- en verdampingswarmte**. De polariteit van water verklaart waarom **zouten** (ionen) en polaire stoffen (zoals **suiker**) zo goed in water oplossen.

1.3. Eigenschappen van water en ijs en het vries/dooi proces in de bodem

1. De temperatuur waarbij zuiver water, aanwezig in afzettingen van grind en zand, verandert in ijs, het **vriespunt**, bedraagt 0 °C onder normale omstandigheden van druk. In bodems met een fijnere textuur, zoals kleibodems, kan het vriespunt dalen tot -3 °C of lager vooraleer het bodemwater bevroert. Kleideeltjes bevatten immers veel water gebonden aan en rond de kristalstructuur, waardoor de bodem trager bevroert. De aanwezigheid van zout verlaagt eveneens het vriespunt.
2. Wanneer **water bevroert, zet het uit. Het volume van het ijs tegenover water, neemt met ongeveer 9 % toe**. De dichtheid van ijs is dus lager dan die van water, vandaar dat ijsbergen drijven. Bij verder afkoelen van het ijs, zal het ijs krimpen (zie 7).
3. De groei van ijs uit water, **ontwikkelt een druk die de 2200 atmosfeer overschrijdt** (Leunissen & Yi, 2009). Deze druk kan een rotsblok breken, een wegdek of zelfs een gebouw beschadigen. Dit is een van de belangrijkste oorzaken voor kryptoturbatieverschijnselen in vochtige en waterverzadigde bodems.
4. Het **bevriezen van de bodem** brengt een **zeer sterke uitdroging** teweeg, omdat het bodemwater bevroert en ijs gevormd wordt. In België zijn de weersomstandigheden het droogst (d.w.z. met een zeer lage relatieve luchtvochtigheid) wanneer het vriest onder een heldere hemel. Vriestemperaturen kunnen bijvoorbeeld nog steeds water onttrekken aan 'droge' bodemonsters die al jaren lang in een laboratorium liggen.

5. Aangezien de bevroren grond extreem droog is, zal er een **capillaire zuigkracht** ontstaan **die het bodemvocht van de omringende niet bevroren bodem naar het vriesfront aantrekt**. De capillaire zuigkracht is een kracht waarbij water doorheen de poriën wordt gezogen tegen de zwaartekracht in.
6. De **thermische geleidbaarheid** (warmtegeleidingscoëfficiënt) is een materiaalconstante die aangeeft hoe goed het materiaal warmte geleidt. Wanneer twee oppervlakken eenzelfde temperatuur hebben, bijvoorbeeld een houten en een stenen oppervlak, dan zal hout warmer aanvoelen dan steen. Leg je een hand op een houten of op een stenen oppervlak, dan 'verliest' de hand op het stenen oppervlak meer warmte dan de hand op het houten oppervlak. Dit komt doordat de thermische geleidbaarheid hoger is voor steen dan voor hout dat sterker isolerend is. **Het vriesfront zal dus sneller bewegen in stenen en rotsen dan in de omringende bodem** die naast fijnere bodemdeeltjes ook nog water en lucht bevatten.
7. Veranderingen in de temperatuur van gassen, vloeistoffen en vaste stoffen veroorzaken uitzetting en krimp van het materiaal. Thermische uitzetting/krimp (of thermische expansie/contractie) zorgt ervoor dat een brug, een gebouw, een spoorrail... in de zomer iets langer is en in de winter iets korter. De mate waarin een materiaal uitzet of krimpt wordt aangegeven door de **thermische uitzettingscoëfficiënt**. In de natuur is **ijs de stof met de hoogste thermische uitzettingcoëfficiënt** (10 keer hoger dan graniet en 5 keer hoger dan staal).
8. Regenwater lost CO_2 op en is licht zuur waardoor de kalk (calciumcarbonaat) kan oplossen. Ijs lost 500 tot 1000 keer minder CO_2 op dan water waardoor **kalk zal neerslaan wanneer water verzadigd met kalk bevriest** (ontstaan van kalkneerslag) (figuren G2-G6).
9. De **vorstpenetratie in de bodem**, dit wil zeggen de manier en de snelheid waarop vorst in de bodem dringt, is zeer variabel. Naast de bodemtextuur zijn de belangrijkste omgevingsfactoren:
 - luchttemperatuurregime (intensiteit en duur van de koude, snelheid van afkoeling...);
 - bodemvochtigheid: natte bodems bevriezen trager dan droge bodems, de vorstpenetratie is het diepst in gesteente;
 - aanwezigheid van een sneeuwdek: sneeuw is sterk isolerend waardoor de bodem minder snel bevriest;
 - vegetatiedek en bodemgebruik: bodems op een akker bevriezen vlugger en dieper dan deze onder een bos met een isolerende strooisellaag.
10. In de bodem gaat **vorstpenetratie sneller met de diepte**, omdat de diepere bodemhorizonten en -lagen, als ze buiten het bereik van de grondwatertafel liggen, een lager vochtgehalte hebben als gevolg van capillaire opstijging naar het vriesfront.
11. Een **vochtige bodem die bevriest, gedraagt zich als een gesteente** en kan zelfs gebruikt worden voor constructiemateriaal in regio's waar de temperatuur permanent onder 0°C is zoals in tunnels en mijnen (En.: *permacrete*; Fr.: *géliment*) (Harris *et al.*, 1988).
12. De **grote soortelijke warmte van water maakt dat natte bodems relatief traag bevriezen**. Wattertoevoer kan een bevroren bodem (ijs) doen dooien. In periglaciale regio's is er in actieve alluviale bodems en onder rivieren en meren geen permafrost aanwezig, terwijl de rivieren en meren zelf wel bevriezen. Deze bodems die gevrijwaard blijven van permafrost noemt men **'taliks'**.

Vorming van kalkneerslag door het bevriezen van water verzadigd met kalk (8) (figuren G2-G6)

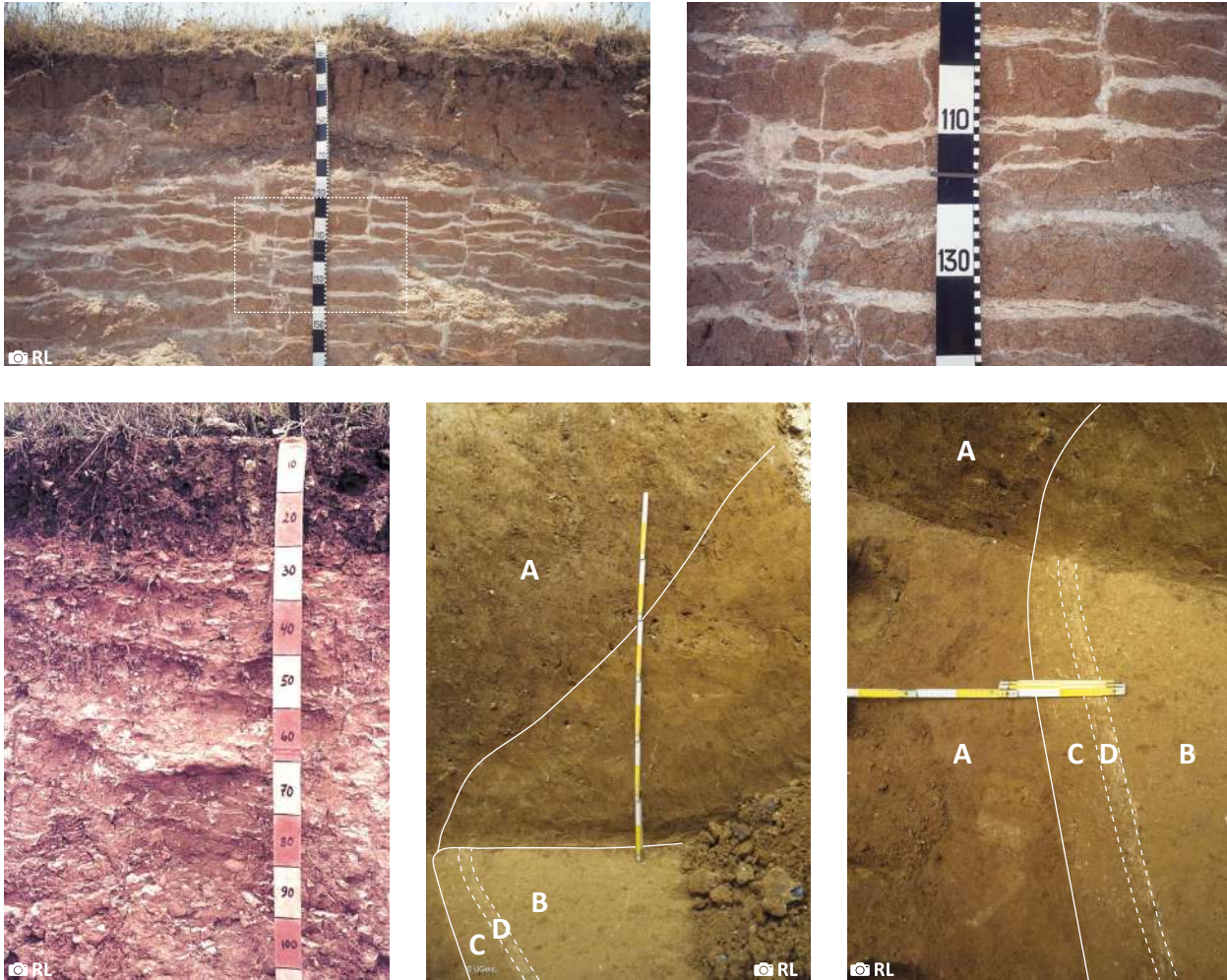


Fig. G2: Kalkneerslag op sporen van ijssegregatie. De bodemmatrix is kalkhoudend. Castilië en León, Spanje.

Fig. G3: Detail van fig. G2, kalkneerslag.

Fig. G4: Witte kalkneerslag op de plaatvormige structuur gevormd door ijssegregatie. Altiplano, Cajamarca, Peru.

Fig. G5-G6: Vorming van kalkneerslag langs de wand van een opgevulde gracht met donkerbruine opvulling in een lössprofiel (A). Ter hoogte van het horizontaal vlak is de kalkrijke löss bereikt (B). De vorst is vanaf de open grachtwand (C) ongeveer 12 cm diep in de bodem gedrongen met de vorming van een ijsblad (D). Het kalkrijke water is naar de bevroren bodem gemigreerd, maar omdat ijs minder kalk oplost dan water (8), slaat kalk neer ter hoogte van het ijsblad. Na het afsmelten van het ijsblad blijft een kalkrijk bandje achter in de bodem. De kalkneerslag (wit) is dus niet de grachtwand. Gallisch oppidum, Ribemont, Departement de l'Aisne, Frankrijk. (Amandry *et al.*, 2009).

1.4. Chronologie van de laatste ijstijd, het Weichseliaan, en de evolutie van het bodemlandschap

Een vereenvoudigde chronologie is weergegeven in tabel G1. De geïntegreerde tabel met de geologische en archeologische chronologie is voorgesteld in het thema 'Voorbereiden en uitvoeren van aardkundig onderzoek'.

De **laatste ijstijd, het Weichseliaan**, loopt ruwweg van 116.000 tot 11.650 jaar BP. Het Weichseliaan was geen ononderbroken koude periode, maar werd gekenmerkt door een afwisseling van koudere (stadialen) en warmere periodes (interstadialen). Deze periode wordt opgesplitst in drie belangrijke fasen: het Vroegglaciaal, het Pleniglaciaal en het Laatglaciaal (soms ook Tardiglaciaal genoemd). Tijdens het **Vroeg- en het Pleniglaciaal** waren er belangrijke perioden (stadialen) met een extreem koud klimaat met zeer schaarse vegetatie (poolwoestijn), permafrost en vorming van ijswiggen. In Noord-België werden pleniglaciale dekzanden afgezet, in Midden- en Zuid-België löss. Oorspronkelijk bevatten zowel de dekzanden (Langohr & Marcelino, 2012) als de löss 10 % kalk. De kalkrijke löss wordt soms 'ergeron' genoemd.

De stadialen wisselden af met relatief korte interstadialen met een iets zachter klimaat met toendra of bosvegetatie. Tijdens de interstadialen werd er geen

zand of löss meer afgezet maar vond er een zwakke bodemgenese plaats.

Rond 14.650 BP wordt het klimaat wereldwijd zachter en begint het Laatglaciaal. Ook in het Laatglaciaal komen warmere periodes afgewisseld met koudere voor. De warmere periodes, de interstadialen **Bølling** en **Allerød**, wisselden af met **twee koudere stadialen**, de **Dryasperiodes**. Tijdens de **Bølling** en **Allerød** was het klimaat koel maar gematigd. De boomgrens schoof op naar het noorden met in België een boreaal bos (berken, dennen...). De bodems waren nu stabiel (geen erosie-sedimentatie processen) en de bodemgenese was uitgesproken, met een sterke ontkalking van de sedimenten. Deze ontkalking was waarschijnlijk te wijten aan een belangrijke hoeveelheid sneeuw in de winter. Aangezien koud water meer koolstofdioxide kan oplossen dan ijs, is koud water zeer efficiënt in het ontkalken van de bodem. Verder was er in die periode een groot overschot van precipitatie t.o.v. de evapotranspiratie wat tot meer uitloging leidde. In de leembodems reikte de ontkalking tot ongeveer 1- 1,3 m diepte. In deze bodems was de biologische activiteit belangrijk.

Geologische perioden				Biozone	Datering			
Systeem	Serie	Etage (NW-Europa)						
Periode	Tijdvak	Tijd						
Ijstijdfasen				Vlaanderen	Begin (BP)	Einde (BP)	Begin (BCE)	Einde (BCE)
Quartair	Pleistoceen	Eemiaan interglaciaal			126.000	116.000	124.000	114.000
		Weichseliaan glaciaal	Vroegglaciaal		116.000	73.000	114.000	71.000
			Pleniglaciaal		73.000	15.000	71.000	13.000
			Laat Pleniglaciaal		15.000	14.650	13.000	12.700
			Laatglaciaal	Bølling interstediaal	14.650	14.000	12.700	12.050
				Oude Dryas stadiaal	14.000	13.900	12.050	11.950
				Allerød interstediaal	13.900	12.850	11.950	10.900
				Jonge Dryas stadiaal	12.850	11.650	10.900	9.700
		Holoceen			Preboreaal	11.650	10.600	9.700

Tabel G1: Vereenvoudigde chronologie van het voorlaatste interglaciaal, het Eemiaan, het laatste glaciaal, het Weichseliaan en het begin van het Holoceen. De uitgebreide chronostratigrafische en geochronologische tabel is voorgesteld op het einde van het thema 'Voorbereiden en uitvoeren van aardkundig onderzoek'

222 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

De pleniglaciale dekzanden bevatten aanvankelijk enkele procenten klei en leem. Na de ontkalking trad er kleimigratie op met de ontwikkeling van een klei-uitlogings- (E) en een klei-aanrijkhshorizont (Bt) (zie thema 'Organische en minerale (klei) colloïdenmigratie'). In de zandstreek is het kleimigratieproces te herkennen aan banden van klei-uitloging en klei-aanrijking (E/Bt banden).

Het Laatglaciaal sluit af met een bijzonder koude periode, de **Jonge Dryas**. Op enkele jaren tijd daalde de temperatuur zodanig dat er in België terug periglaciale milieucondities heersten. Op het Ardens plateau (Hoge Venen) ontwikkelden zich plaatselijk lithalsa's (zie § 3.5) (e.g. Pissart, 2000) en in de bodems van heel België zijn sporen van permafrost onder de vorm van een fragipan te zien (zie § 3.2). Voor de ontwikkeling van ijswiggen daarentegen, waren de perioden van uitgesproken vorst vermoedelijk te kort.

In de **zandstreek** werd, door de zeer barre milieucondities, het vegetatiedek teruggedrongen en ontstonden er zones zonder vegetatie. Vooral op de hogere reliëfeenheden zoals duinen kon sterke deflatie – het wegvoeren van bodemdeeltjes door de wind – plaatsvinden. De wind zette het geërodeerde zand af in depressies zoals moerassen met veen, poelen, vijvers ... Het is hier onder andere dat we nog plaatselijk begraven bodems kunnen observeren zoals bijvoorbeeld de **Usselo-bodem**. In deze voormalige depressies toont de Usselo-bodem de kenmerken van een onderwaterbodems (figuren G7-G10) (Louwagie & Langohr, 2005: 33). In de diepere meren bleven de lacustriene bodemsedimenten vrij van vorst (een 'talik'), maar in de ondiepere zones kon vorst optreden met sterke kryoturbatie van de waterverzadigde sedimenten (figuren G92-G94).

In de **leemstreek** bleef het bodemlandschap grotendeels stabiel met een duidelijke impact van de

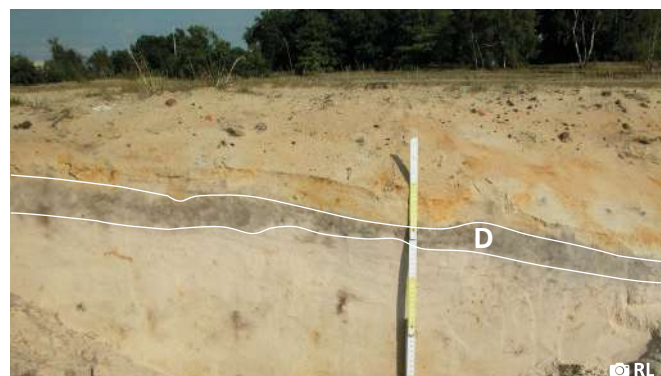
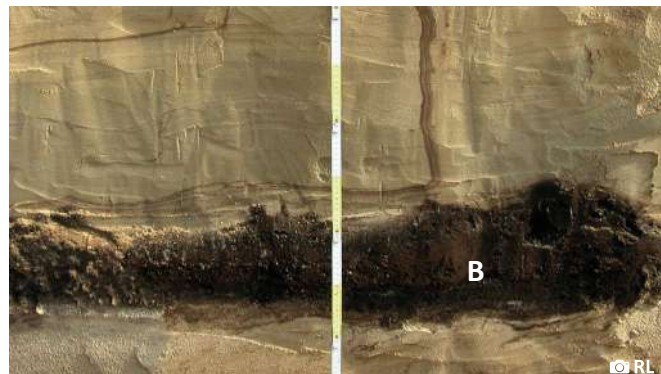
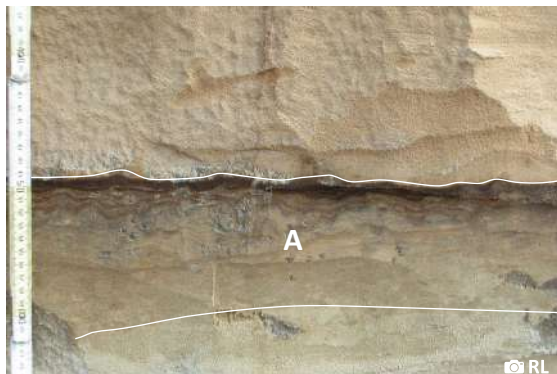


Fig. G7-G10: Usselo-bodem. Het gaat hier om een bodem die ontwikkeld is onder water op de bodem van meren van de Allerød periode. Tijdens de Jonge Dryas zijn de omringende duinen volledig geërodeerd en is het zand afgezet op de bodem van de meren. Kenmerkend voor zulke waterbodems is de afwezigheid van bioturbatie door wortels en dieren.

Fig. G7: De bodem is hier ongeveer 10 cm dik (A) en bevat iets meer klei en leem die trager sedimenteerden in het water tijdens de pleniglaciale zandafzetting. Maatheide, Lommel, provincie Limburg België.

Fig. G8: Accumulatie van organische stof (B) aangevoerd door de wind en afgezet langs de meeroever. Maatheide, Lommel, provincie Limburg, België.

Fig. G9: De homogene bruine horizon in de bovenste helft is waterhard (C) (doppleriet) afkomstig van een hoger gelegen veenlaag. Verrebroek, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Louwagie & Langohr, 2005).

Fig. G10: Humusafzetting (D) in een licht gebleekte horizon. Maatheide, Lommel, provincie Limburg, België.

permafrost op de bodem met de ontwikkeling van een fragipan (zie § 3.2). Zeer plaatselijk kon er in de valleibodems of op de hellingen wel erosie plaatsvinden. In de valleibodems trad erosie op door de plotse toevoer van grote hoeveelheden water als gevolg van de dooi van sneeuw op een nog bevroren bodem op de hellingen. Hierdoor ontstond er een specifieke geomorfologie van de valleibodems met zigzag ravijnen en meanderende rivieren met erosie van de valleiwanden. Deze sporen zijn nog duidelijk te observeren in het Zoniënwoud (Sanders *et al.*, 1985). Elders kan men sporen van thermokarst waarnemen (zie § 4.7). Dit proces is te wijten aan de aanwezigheid van een dikke ijslaag in de permafrostbodem. Tijdens de dooiperiode ontstond er zo op hellingen een zeer onstabiele bodem met modderstromen of grondverschuivingen, waardoor de bodems naar beneden gleden (figuren G11-G13) (zie thema 'Erosie en sedimentatie'). De originele bodem op de voethelling en in de depressies werd

begraven, zoals geobserveerd in het Meerdaalwoud en het Bertembos (figuren G12-G13).

Het einde van de Jonge Dryas sluit de periode van het Weichseliaan definitief af. Dit is het begin van het laatste interglaciaal of van het **Holoceen**, de periode waarin we ons nu bevinden. Het klimaat wordt definitief gematigd met afwisselend iets drogere/vochtige en/of warmere/koudere perioden. Oorspronkelijk blijft erosie vooral beperkt tot de rivieren en de kust. Elders is het bodemlandschap onder het uitgestrekte bosbestand stabiel. Dit zal veranderen vanaf het ogenblik dat de mens het bos begint te rooien voor landbouw.



Fig. G11: Valleioofd in de vorm van een amfitheater. Zoniënwoud, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België. (Langohr, 2016).



Fig. G12: Depressie gevormd door thermokarst (§ 4.7), zonder waterloop, zie ook fig. G175. Pruikenmakersbos, Meerdaalwoud, Bierbeek, provincie Vlaams-Brabant, België. (© Digitaal Vlaanderen) (Langohr, 2008).

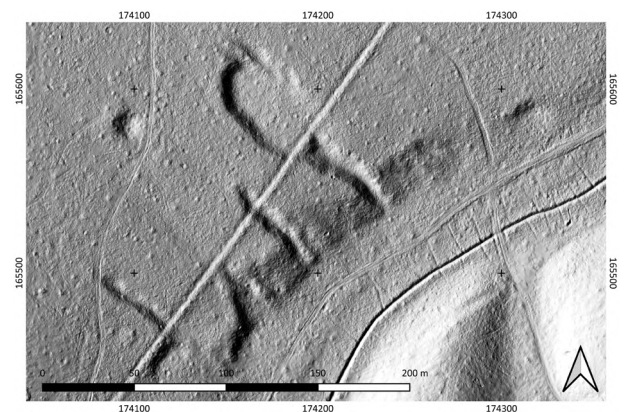


Fig. G13: Detail van Fig. G12. Sporen van thermokarst langs de valleihellingen. (© Digitaal Vlaanderen)

1.5. Verspreiding van periglaciale sporen van het Weichseliaan in België

Uitgestrekte zones van bodems in België vertonen vandaag sporen van periglaciale processen. Vooral in begraven bodems in de löss- en dekzandgebieden zijn er sporen te zien die dateren van het Vroeg- en het Pleniglaciaal. Dit zijn **fossiele bodems** zoals bijvoorbeeld de bodem van Warneton en de Kesseltbodem (e.g. Haesaerts & Van Vliet, 1973; Heyse, 1983; Langohr & Sanders, 1984).

Andere duidelijke kenmerken van periglaciale processen bevinden zich in de huidige oppervlaktebodems, maar de processen die geleid hebben tot deze kenmerken zijn vandaag niet meer actief en verwijzen naar vroegere milieuomstandigheden. Dit zijn **relicte bodemkenmerken** (e.g. Langohr & Sanders, 1984). Sporen van periglaciale processen zijn wijdverspreid in de Ardense bodems, voornamelijk in de vorm van een sterk ontwikkelde fragipan horizont en sporen van kryoreptatie (zie § 4.3) (Bock *et al.*, 2010; Langohr *et al.*, 2012). Stenige bodems vertonen plaatselijk duidelijk gesorteerde polygonen die dateren van vóór de fragipan ontwikkeling (Langohr & Van Vliet, 1979). Op de hogere veengebieden liggen er lithalsa's: talrijke dooimeren omgeven door een aarden wal (zie § 3.5). Al deze bodems zijn weinig of niet verstoord door landbouwactiviteiten.

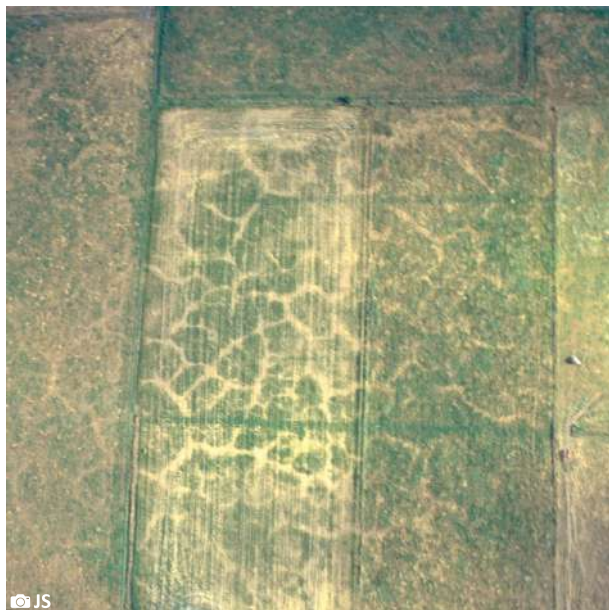


Fig. G14: Sporen van opgevulde fossiele ijswiggen of ijswipseudomorfen (zie § 3.3). De meeste polygonen hebben een diameter tussen 5 en 10 m. Aalter, provincie Oost-Vlaanderen, België.

In leem-, zandleem- en lemig zandbodems van Midden-België is de aanwezigheid van de fragipan (zie § 3.2), een proxy voor permafrost, grotendeels verdwenen door landbouwactiviteiten (Van Vliet & Langohr, 1981). Het is enkel onder bos zoals bijvoorbeeld in het Zoniënwood dat de fragipan goed bewaard is gebleven (Langohr *et al.*, 2015).

In de zandstreek van Noord-België, waar het tertiair substraat dagzoomt, zijn er duidelijke sporen van fossiele ijswiggen onder de vorm van ijswipseudomorfen (zie § 3.3) (figuren G14, G15) (Heyse & Ghysels, 2003). Dit zijn ook zones waar op talrijke plaatsen gesorteerde polygonen voorkomen. Verder zijn er ook de spectaculaire kryoturbatiesporen in de bodems op de Maasterrassen (figuren G16, G17).

Sporen van periglaciale processen zijn afwezig in jonge bodems die dateren van het begin van het Holoceen of die nog jonger zijn. Enkele voorbeelden van dergelijke jonge bodems zijn: polders, alluviale en colluviale bodems en bodems die sedert eeuwen



Fig. G15: Depressie met stagnerend water ter hoogte van een ijswipseudomorf. Lieremans Staartje, Oud-Turnhout, provincie Antwerpen, België.

onder intensieve landbouw liggen (groot deel van de leemstreek).

Het is duidelijk dat sporen van periglaciale processen wijdverspreid zijn in de Belgische bodems. Hierover bestaat er uitgebreide literatuur. De eerste publicatie is waarschijnlijk die van Tavernier (1945) gevolgd door vele andere, bijvoorbeeld Maréchal (1956),

Maréchal & Maarleveld (1955), Pissart (1964). De bedoeling van dit thema is om het belang aan te tonen van periglaciale processen en om de sporen hiervan in de bodems te kunnen herkennen, niet om een volledig literatuuroverzicht voor te stellen.



Fig. G16 - G17: Profiel doorheen grote gesorteerde polygonen/cirkels. Het terrasgrint is opgetild en dekzand stulpt naar beneden tot een diepte van 180 cm. De waterverzadiging in de actieve laag was waarschijnlijk te wijten aan een permafrost in de onderliggende ongestoorde grindlaag. Maasterras, Kempen, België.

2. Vries/dooi processen

Zoals besproken in § 1.3 is de impact van vries/dooi op bodems sterk afhankelijk van bodem- en meteorologische condities. In de volgende hoofdstukken (§ 2 – § 4) vertrekken we van processen met de minste impact op de bodem en gaan we geleidelijk over tot processen die de bodem sterk verstoren zoals bijvoorbeeld kryoturbatie. De cijfers **1** tot **12** verwijzen naar de begrippenlijst in § 1.3.

2.1. Vries/dooi aan het bodemoppervlak

Wanneer vorst in een vochtige, poreuze oppervlaktehorizont optreedt, kunnen er zich '**ijsnaalden**' loodrecht op het oppervlak, ontwikkelen (**5**). In functie van de hoeveelheid vocht dat naar het vriesfront migreert, kan het **naaldijs**, ook '*pipkrakes*' genoemd (Zweeds: *pipa*: buis, *krake*: fijn, zwak), meerdere centimeters lang worden. Hierbij kan het naaldijs de strooisellaag (figuur G18) en het bovenste deel van de bodem enkele centimeters optillen. Tijdens de dooi kan er dan erosie ontstaan door de

afvoer van water op de nog bevroren bodem (figuur G20). Bij **ijssegregatie** worden er dunne bandjes of lenzen van ijs gevormd door het aantrekken van water uit de nog niet-bevroren lagen naar het bevroeringsfront. Vochtige bodemkluiten die aan het oppervlak liggen, kunnen door ijssegregatie (zie § 2.2) gefragmenteerd worden (figuur G19). Dit is een belangrijk proces bij kleirijke bodems die moeilijk te bewerken zijn, omdat de droge bodemaggregaten zeer hard zijn, een natte bodem daarentegen heeft een hoge plasticiteit en kleverigheid. De groei van het ijs (**3**) door de vorst veroorzaakt een grote inwendige druk waardoor grote kluiten klei verbrekelen. Dit proces wordt gebruikt door landbouwers in gebieden met kleibodems zoals bijvoorbeeld in de polders, zodat hierdoor een zaai-bed wordt gevormd dat uit een zeer fijne blokvormige structuur bestaat (figuren G21-G25).

Vries/dooi processen: vorming van naaldijs (figuren G18-G20)



Fig. G18: Het naaldijs is zo'n 4 cm hoog en tilt de strooisellaag van een bosbodem op. Füllinsdorf, Zwitserland.



Fig. G19: De groei van naaldijs heeft het bodemoppervlak, inclusief de jonge planten, sterk verstoord. Tuinbodem.



Fig. G20: Erosie op zuidgerichte hellingen in het zuidelijk halfrond. Tijdens de winter wordt naaldijs gevormd. In de lente veroorzaakt de dooi van het naaldijs bodemerosie, omdat het smeltwater niet in de bevroren bodem, die wateron-doorlatend is, kan dringen. Andosol, Precordillera, Centraal Chili.

Vries/dooi processen: oppervlakkige structuurvorming (figuren G21-G25)



Fig. G21-G22: Blote grond opgetild en verbrokkeld door de vorming van naaldijs. Garfagnana, Italië.



Fig. G23: Links, een ongestoorde verweerde blok polderklei, rechts een gelijkaardige blok die vorst heeft ondergaan en die uit elkaar is gevallen. Polderstreek, Silsoe, Engeland.



Fig. G24: Detail van fig. G23 rechts. Vorming van een fijne blok-vormige structuur door vorstwerking. Polderstreek, Silsoe, Engeland.



Fig. G25: Fragment van tertiaire klei, door de vorst gebroken in een fijne hoekige blokstructuur. Zandgroeve, Limburg, België.

2.2. Vorstpenetratie en dooi in een vochtige grond met homogene textuur, met of zonder grove elementen

Naarmate de vorst in de bodem dringt, zal de bodem zeer sterk uitdrogen (**4** ultra-uitdroging). Vanuit de diepere horizonten wordt water door de capillaire zuigkracht (**5**) naar het vriesfront aange trokken. Deze zuigkracht is laag in zand, groter in leem en nog sterker in klei, maar in kleibodems verloopt dit proces trager, omdat de poriën zeer klein zijn. Belangrijk is **de verhouding tussen het open poriënvolume en de hoeveelheid water die naar het vriesfront migreert**. In het begin vormen zich ijsnaalden in de nog open poriën (figuren G19-G22), maar vanaf dat alle poriën gevuld zijn, vormen er zich min of meer evenwijdig aan het vriesfront ijsbladen, ijslaagjes of ijslenzen (figuren G26, G27). De groei van ijslenzen in de bodem of aan het bodemoppervlak wordt **ijssegregatie** genoemd.

In gecompacteerde bodemhorizonten zal de vorming van ijsbladen meer uitgesproken zijn, zoals bijvoorbeeld in bodems verdicht door verkeer (paden, rond bewoningsites, ploegzool) (figuren G28, G29, G32, G33). In deze bodems is de porositeit afgenomen met als gevolg minder vorming van naaldijs, maar meer van ijslenzen. Dikwijls kan men op de structuurvlakken door oxidatie een neerslag van ijzer en/of mangaan observeren (figuren G35-G41).

Vries/dooi processen: structuurvorming door ijssegregatie (figuren G26-G30)



Fig. G26: Ijssegregatie en de vorming van een bladstructuur. Leembodem, Zoniënwood, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België.



Fig. G27: Detail van ijssegregatie met vorming van ijsnaalden. Leembodem, Zoniënwood, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België.



H1: grond die een voormalig pad begraaft.

H2: begraven oppervlaktehorizont van een oud pad. De bodem van het pad is sterk samengedrukt. Door vroegere ijssegregatie ontwikkelde er zich een bladstructuur. Sporen van roest op de bladstructuur.

H3: niet verdichte horizont met vloestructuren als gevolg van de druk uitgeoefend door het pad.

H4: horizont met talrijke humusrijke fragmenten. Op deze diepte is de bodem niet meer samengedrukt door het pad (H2).



▲ Fig. G29: Zelfde profiel als fig. G28 bewerkt met een mes om het oppervlak los te maken en vervolgens afgeborsteld om de structuur beter zichtbaar te maken.

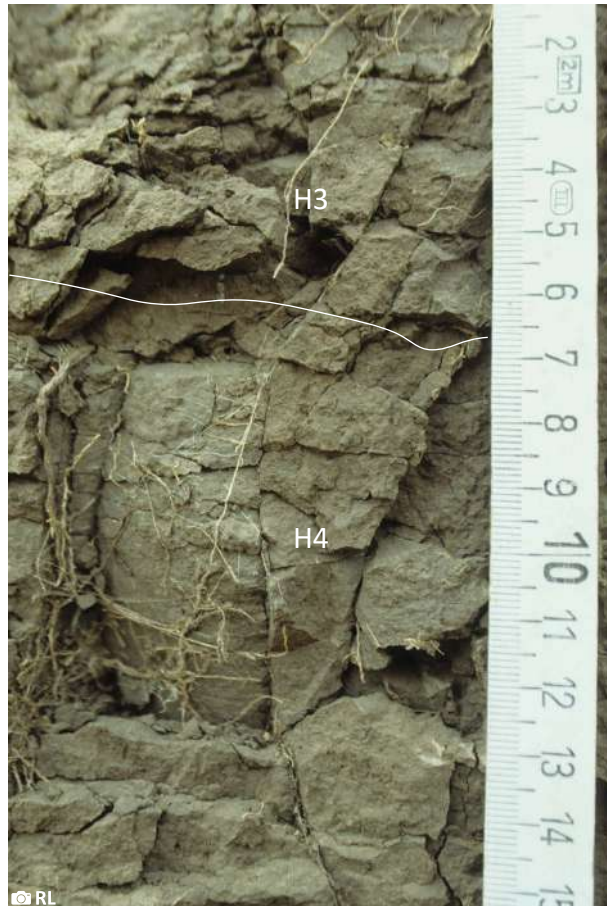
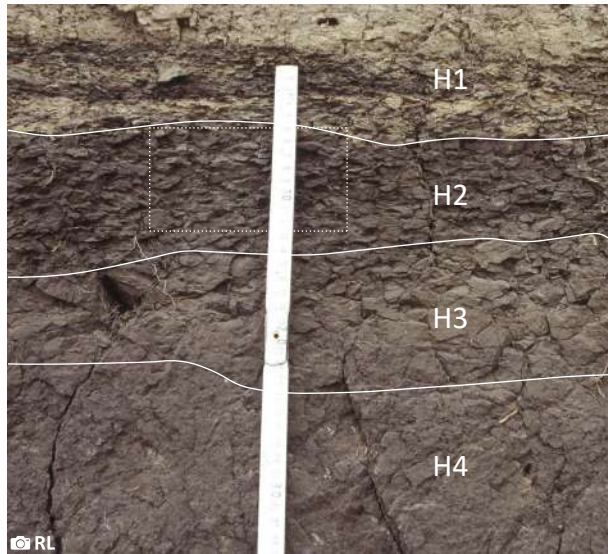
◀ Fig. G28: Gladgestreken profiel. Plaatstructuur gevormd door ijssegregatie in een leembodem verdicht door intense betreding (oud pad). Lössbodem, Velzeke, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. G30: Ijssegregatie heeft de verticale biogalerijen onderbroken en verplaatst. Fig. G31: Detail van fig. G30. Afgedekte zandige opduiking van Oudenaarde Donk. Alluviale vlakte van de Schelde, provincie Oost-Vlaanderen, België.

De ijsbladen die zich vormen ter hoogte van het vriesfront in de bodem, zijn verantwoordelijk voor de ontwikkeling van een nieuwe blad-, plaat- of lensstructuur (figuren G28-G31) (e.g. Van Vliet-Lanoë, 1976) (zie thema 'Bodemstructuur, druk en compactie'). Met de diepte worden deze aggregaten geleidelijk aan dikker (minder ijssegregatie) omdat de diepere bodem langzaam uitdroogt (figuren G32-G34) en er dus minder water beschikbaar is voor het ontwikkelen van ijsbladen. Door de sterke uitdroging van de diepere bodem ontwikkelt zich een nieuwe structuur van hoekige blokken en prisma's, ditmaal gebonden aan het uitdrogingsproces. Gebeurt deze uitdroging eerder plots, dan hebben de blokken en prisma's een conchoïde vorm (figuur G34). Bij sterke uitdroging vanaf het bodemoppervlak kan een verticaal barstenpatroon ontstaan met of zonder de vorming van een prismastructuur (Svensson, 1977; Sveistrup *et al.*, 2005; Van Vliet-Lanoë, 2005: 243).

Vries/dooi processen: structuurvorming door ijssegregatie (figuren G32-G34)



H1: bladstructuur te wijten aan ijssegregatie.

H2: lensvormige structuur te wijten aan ijssegregatie.

H3: conchoïde hoekige blokstructuur te wijten aan uitdroging, gevolgd door ijssegregatie.

H4: conchoïde prismastructuur te wijten aan plotse sterke uitdroging. In lange vorstperioden kan er ook ijssegregatie optreden tussen de structuurvlakken.

Fig. G32-G34: Ijssegregatie is uitgesproken in compacte bodems. Voorbeeld van structuurvorming in een door tractoren sterk verdichte bodem. Wanneer het vriesfront in de bodem dringt, migreert het water van de onderliggende horizonten naar het vriesfront. Door de lage bodemporositeit worden er geen ijsnaalden, maar wel ijslenzen gevormd (fig. G33). De wortels kunnen slechts langs de structuurvlakken groeien (fig. G34). Lössbodem, Debrecen, Hongarije.

Wanneer de ijsbladen sterk aangroeien, zet het bodemvolume uit en wordt het grondoppervlak naar boven geduwd, dit is **opvriezen of vorstopheffing** (En.: *soil heaving*). Dit proces kan wegen, huizen, pijpleidingen... beschadigen.

De vorstimpact is sterk verschillend naargelang men zich onder bos, op weide of akker bevindt. De organische horizonten, zoals strooisel, gefragmenteerde plantenresten en humus aanwezig onder bos, werken sterk isolerend, zodat het vorstfront niet zo diep in de bodem kan dringen (e.g. Svestrup *et al.*, 2005).

Wanneer het vriesfront van bovenaf een steen in de bodem bereikt, zal de vorst daar dieper in de grond dringen. Dit komt omdat de steen een hoge thermische geleidbaarheid (6) heeft. De steen koelt dus sneller af dan de omringende bodem. Naarmate water van de diepere bodem naar het dichtstbijzijnde vriesfront wordt aangetrokken, zal het water eerst het onderste deel van de steen bereiken. Hierdoor ontstaat aan de onderkant van de steen een relatief belangrijke ijssegregatie. Als gevolg hiervan wordt de steen omhooggeduwd en de bovenliggende aarde samengedrukt (figuren G42-G45). Bij de dooi van de bodem ontstaat er aan de onderkant van de steen, waar de ijslens groeide, een holte en is dit steenoppervlak schoon. De bovenzijde van de steen

daarentegen krijgt een **bodemkapje** van samenge-drukte bodemmatrix (En.: *soil capping*)(figuren G46, G47). Deze morfologie, die wijst op periglaciale processen, is belangrijk bij de studie van stenen artefacten. Dit proces heeft zich blijkbaar nog voorgedaan tijdens de Kleine IJstijd (Crombé *et al.*, 1991). Het is evident dat het **onoordeelkundig reinigen van de artefacten deze informatie uitwist**.

De dooi van een bevroren bodem start aan het oppervlak. Indien tijdens het indringen van de vorst in de bodem veel water naar de hogere horizonten was gestegen, met de vorming van ijsbladen, zal tijdens de dooi meer water vrijkomen dan dat er oorspronkelijk in de poriën aanwezig was. Aangezien de diepere nog bevroren bodem grotendeels ondoorlatend is (alle poriën zijn gevuld met ijs), kan het water van de ontdooide horizont niet naar beneden percoleren en ontstaat er een oververzadigde onstabiele ‘modderige’ toestand bovenaan het

bodemprofiel. Op dat ogenblik wordt in zo’n milieu bijvoorbeeld een wegdek onstabiel en is verkeer zeer moeilijk, vaak onmogelijk. Op hellingen kan er erosie ontstaan (zie § 1.2). Vanaf het ogenblik dat de ondergrond is ontdooid, zal het hoger gelegen vrije water plots kunnen percoleren naar de diepere bodemhorizonten die voorheen verdroogd waren.

Een bevroren grond gedraagt zich als een gesteente (**11**). Wanneer ijssegregatie optreedt, met de vorming van ijsbladen, kunnen de stenen in de bevroren grond splijten (vorstspijten; En.: *frost cracking*; Fr.: *gélifraction*) (figuren G48-G51).

Vries/dooi processen: ijssegregatie en hiermee geassocieerde oxido-reductie

Terrasafzettingen. Sologne, Frankrijk (figuren G35-G39). Roborst leemgroeve, Oost-Vlaanderen, België (figuren G40-G41)



Fig. G35: In het midden van het profiel een ijswipseudomorf. De gangen bovenaan in het profiel zijn sporen van een dassenburcht.



Fig. G36: Sporen van ijssegregatie met pseudogley kenmerken. De reductiekleuren (grijs) zijn te zien langs de vorstspalten, de oxidatiekleuren (oranjerood) in de matrix.



Fig. G37: Spoor van een vorstwig met pseudogley (A).



Fig. G38: Fragipan met sporen van '*reticulate ice veins*'. (Mackay, 1974).

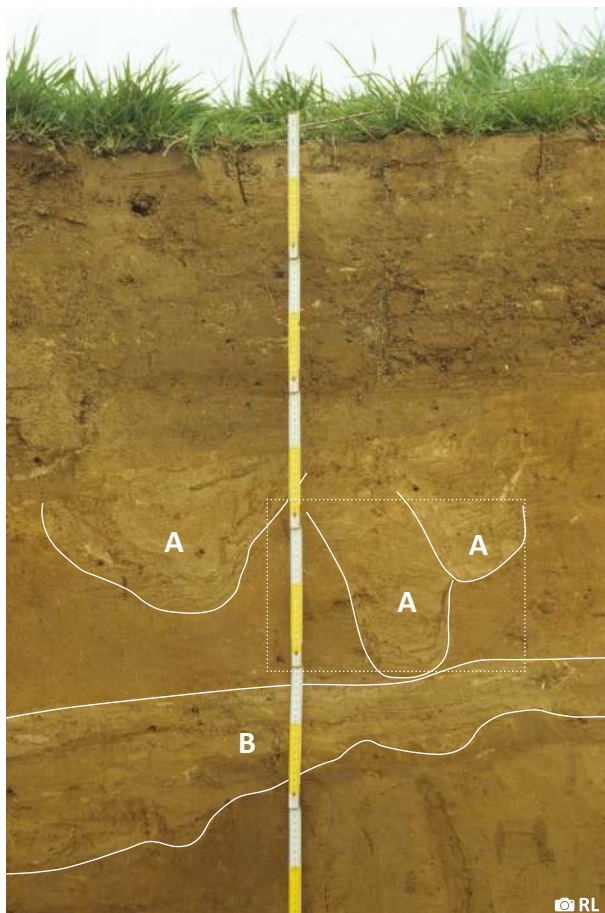


Fig. G40: Bodemverdichting door verkeer. Tussen 80-100 cm (B) is er een horizontale gebleekte horizont van een wegdek. Daarboven, tussen 40-80 cm zijn er drie instulpingen (A) van karrensporen. (Ampe & Langohr, 2006a).



Fig. G39: Detail van fig. G38: Pseudogley langs sporen van ijssegregatie.



Fig. G41: Detail van het karrenspoor op fig. G40 met duidelijke sporen van ijssegregatie in de vorm van dunne donkergekleurde bandjes. Neerslag van ijzer op de plaatstructuur door de aanwezigheid van zuurstof langs de barstjes.

Vries/dooi processen: ijssegregatie en hiermee geassocieerd opvriezen van stenen (figuren G42-G44)



Fig. G43: De linkzijdige van de steen is opgetild. De afwezigheid van korstmosbedekking wijst op een actief proces. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.

◀ Fig. G42: De rechterzijdige van de steen is opgetild door ijssegregatie. Lapland, Finland.



Fig. G44: De grafstenen worden tijdens de winterperioden opgetild waardoor ze niet meer recht staan. Noorwegen.



Fig. G45: Tijdens de winter werden de stenen opgetild, en na zijn ze terug neergezakt wat de aanwezigheid van een barstje rond de stenen verklaart. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.

Vries/dooi processen: ijssegregatie en hiermee geassocieerde capping (figuren G46-G47)



Fig. G46: Steencapping in een bodem met sporen van fijne plaatstructuur door ijssegregatie. Denemarken, Jutland.



Fig. G47: Steencapping (pijlen) aan de bovenkant van de stenen. Aan de onderzijde van de stenen is er, waar het ijs is gesmolten, een open barst. Fluvioglaciale afzettingen, Nieuw-Zeeland.

Vries/dooi processen: ijssegregatie en hiermee geassocieerd vorstspijten (figuren G48-G51)



Fig. G48: Morene, Nieuw-Zeeland.



Fig. G49: Petrocalcic horizont met gebroken steenfragmenten door vorstwerking. Salinas, Ibiza, Spanje.



Fig. G50-G51: Vorstspijten van stenen *in situ*. Inuvik, Northwest Territories, Canada.

2.3. Vorstpenetratie en dooi in een waterverzadigde bodem met homogene textuur en met grove elementen

Eerste fase. Wanneer bodems met een homogene textuur grove elementen bevatten en waterverzadigd zijn, zullen dezelfde processen plaatsvinden zoals beschreven in de vorige paragraaf. De ijssegregatie zal echter onder de stenen veel belangrijker zijn, zodat ze door herhaalde vries/dooi cycli, geleidelijk aan **verticaal** komen te staan. De stenen nemen hierbij een positie in waarbij ze de minste druk ondervinden (figuren G45, G52, G53).

Tweede fase. Wanneer een grondwatertafel aanwezig is, gaan de grove elementen door de druk van het ijs verticaal **naar boven migreren** tot ze het bodemoppervlak bereiken (figuren G54, G55).



Fig. G52: Opgetilde stenen door opvriezen. Fluvioglaciale sedimenten. Nieuw-Zeeland.



Fig. G53: Opgetilde stenen op de grens met het fluvioglaciaal substraat. De stenen van het substraat die niet opgetild zijn, vertonen capping en barsten onder de stenen. Nieuw-Zeeland.



Fig. G54-G55: Opvriezen van stenen: de stenen worden uit de bodem getild. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje, 2700 m hoogte.



Fig. G56: Een 'wandelende steen' op een helling. Door ijssegregatie wordt de steen loodrecht aan het hellend bodemoppervlak opgeduwd. Bij de dooi zakt hij verticaal neer. Hierdoor ontstaat er een hellingafwaartse beweging (pijl) met een depressie achter (A) en een opgestuwde bodem voor de steen (B). Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.

Derde fase. Wanneer een waterverzadigde bodem bevroest (2), ontstaat er een zeer sterke interne druk. Dit is vooral het geval indien er een onderliggende permafrost aanwezig is. Hierdoor vormt er zich een golvend oppervlak van **bulten** omgeven door microdepressies (En.: *hummocks*) (figuren G57-G68). De grove elementen zoals stenen, die nu op het bodemoppervlak liggen, worden bij de vorst opgetild door de groei van ijsnaalden die loodrecht groeien ten opzichte van het bodemoppervlak. Op een helling staan deze naalden dus schuin. Wanneer het ijs begint te dooien, zakken de grove elementen recht naar beneden (zie § 4.2). Zo krijgt men '**wandelende stenen**' (figuur G56) die geleidelijk aan hellingafwaarts bewegen tot in de microdepressies van het golvend oppervlak (figuren G69-G74).

Het eindresultaat. Het landschap vertoont een microreliëf met een polygonaal patroon. Het bestaat uit een golvend bodemoppervlak, begrensd door barsten. Door de opeenvolging van processen hierboven beschreven, gebeurt er een sortering waarbij de fijnere bodemdeeltjes gescheiden worden van de steenfragmenten. De stenen, oorspronkelijk verspreid in de bodem tot een zekere diepte, komen terecht aan de randen van de polygonale structuren en de fijnere bodemdeeltjes blijven achter in het midden van de structuren. Dergelijke morfologie noemt men '**gesorteerde polygonen**' (En.: *sorted polygons*) (figuren G16, G17, G75, G76). De grootste polygonen treft men aan in de zones waar het jaarlijkse vries/dooi proces het diepste reikt. Grovere materialen geven grotere polygonen, in meer waterverzadigde bodems zijn de structuren kleiner.

Vries/dooi processen: niet-gesorteerde polygonen en cirkels (figuren G57-G68)



Fig. G57-G58: Niet-gesorteerde polygonen ('*hummocks*') met een open barstensysteem: er is geen duidelijk verschil in korrelgrootte tussen het materiaal in en langs de randen van de polygonen. Spitsbergen.



Fig. G59: Profiel in niet-gesorteerde polygonen (zie fig. G57-G58). De stratificatie bestaat uit lagen van organisch materiaal sporadisch onderbroken door eolische afzettingen. Spitsbergen, Noorwegen.



Fig. G60: Profiel doorheen een *hummock* met aan beide zijkan ten het barstensysteem. Inuvik, Northwest Territories, Canada.



Fig. G61: Detail van fig. G60 doorheen een *hummock* met sporen van kryoturbatie. De omringende depressie bestaat hoofdzakelijk uit organisch materiaal. De onderzijde van het profiel is de golvende permafrosttafel (foto genomen eind augustus). De dooi reikt minder diep in de waterverzadigde depressie. Inuvik, Northwest Territories, Canada.



Fig. G62-G63: Niet-gesorteerde polygonen/cirkels. Het centrum van de polygonen is lichtjes bol, de lager gelegen randen van de structuren zijn begroeid. In het centraal deel van de polygonen liggen stenen met verschillende afmetingen, de randstenen ontbreken. Northwest Territories, Canada.



◀ Fig. G64: Zicht op een regio met een dominantie van niet-gesorteerde polygonen en cirkels; *hummocks* met een diameter van 0,6-1,5 m. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.



Fig. G65: 'Drunken forest', ► grens van het boreaal bos en de toendra. De *hummocks* zijn niet stabiel genoeg voor de groei van de sparren. Inuvik, Northwest Territories, Canada.



Fig. G66: Leemgroeve: de ont-kalkte löss wordt gebruikt voor de fabricage van rode gevelstenen, de kalkrijke löss voor de gele gevelstenen. De kalkrijke löss komt voor vanaf ongeveer 3 m diepte. Roborst, Zwalm, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. G67-G68: Een profiel op 4 m diepte in de nog kalkrijke löss. Brabantiaan löss (Pleniglaciaal), afgezet in een zeer koud en droog milieu. Niet-gesorteerde polygonen. De stratificatie is te wijten aan de eolische afzetting met sporadisch iets meer tertiair zand. Duidelijke sporen van vorstswiggen. Roborst, Zwalm, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Ampe & Langohr, 2006b).

Vries/dooi processen: gesorteerde polygonen en cirkels (figuren G69-G76)



Fig. G69: Gesorteerde polygonen/cirkels in een valleibodem zonder permafrost (*talik*). Het proces is nog steeds actief. Door de aanwezigheid van een ondiepe permanente grondwater-tafel, is het mogelijk dat het sorteren van stenen uitsluitend door het vries-dooiproces kan plaatsvinden. Skibotn, Troms, Noorwegen.



Fig. G70: Sterk uitgesproken gesorteerde polygonen/cirkels op kustterrassen in een zone met grondwater-tafel. Spitsbergen, Noorwegen.



Fig. G71: Gesorteerde polygonen/cirkels met fijn materiaal in het midden en stenen langs de randen van de polygonen; op plateauoppositie met permafrost. Northwest Territories, Canada.



Fig. G72: Kleine gesorteerde polygonen/cirkels. Spitsbergen, Noorwegen.



Fig. G73: Op hellingen gaan de gesorteerde polygonen/cirkels over tot gesorteerde strepen die georiënteerd zijn volgens de hellingsrichting. De gesorteerde strepen bestaan uit afwisselend min of meer parallelle banden van stenen en tusseninliggende vegetatie. Northwest Territories, Canada.



Fig. G74: Profiel doorheen de gesorteerde strepen op een kalksteenbodem. De bovenste 40 cm van de bodem is verwijderd. Les Souhesmes, Departement de la Meuse, Frankrijk.



Fig. G75-G76: Twee profielen doorheen gesorteerde polygo-nen/cirkels. De stenen bestaande uit krijt zijn opgetild, het lössdek stulpt neerwaarts. De waterverzadiging in de actieve laag was hoogst waarschijnlijk te wijten aan permafrost op on-geveer 1 m diepte. Champagne, Noord-Frankrijk.



2.4. Vorstpenetratie en dooi in een waterverzadigde bodem (watertafel) met contrasterende textuurlagen

De vervorming van de bodemgelaagdheid door vorstactie geeft in de bodem sporen van krypturbatie (§ 1.1). Dit kan soms spectaculaire vormen aannemen, vooral in een bodem die waterverzadigd is en die uit een afwisseling van lagen bestaat met een verschillende textuur. De grovere lagen bevriezen sneller dan de lagen met een fijnere textuur (1). Het water in de grovere lagen zet bij het bevriezen uit en oefent een sterke druk uit op de nog niet bevroren lagen boven en/of onder de grove laag. Hierdoor ontstaan er **instulpingen** of **involuties** die als gevolg van de herhaalde vries/dooi cycli de originele horizonatie en/of gelaagdheid volledig verstoren (figuren G77-G81). Een extreme vorm hiervan is het

ontstaan van een '**druppelbodem**' of '**druipstaart-structuur**' (En.: droplet soil) (Paepe & Vanhoorne, 1967: 35; De Moor & Heyse, 1978: 360; Gullentops & Paulissen, 1978) (figuren G82-G88). In Vlaanderen kan men dit plaatselijk nog zien ter hoogte van de Usselo-bodem (figuren G89-G92).

Vries/dooi processen: involuties (figuren G77-G81)



Fig. G77: Uitgesproken kryoturbatie van een zandige bodem die neerstulpt in een kleisubstraat. Condroz, België.



Fig. G78: Kryoturbatie van geeloranje pleniglaciale dekzanden die neerstulpen in de groene glauconietrijke tertiaire klei. Later heeft er zich in de oppervlakkige zanden een ijzer-humus-podzol ontwikkeld. Het Aanwijjs, Beernem, West-Vlaanderen. (Ampe & Langohr, 2006a).

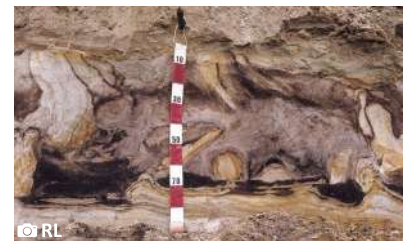


Fig. G79-G81: Kryoturbaties van de humusrijke oppervlaktehorizont. Nederland.

Vries/dooi processen: zinkstructuren – druppelbodem of druipstaarten (figuren G82-G92)



Fig. G82: Een humusrijke horizon volledig verstoord door kryoturbatie (druppelbodem of druipstaartstructuur). Vlaamse Vallei, provincie Oost-Vlaanderen, België.

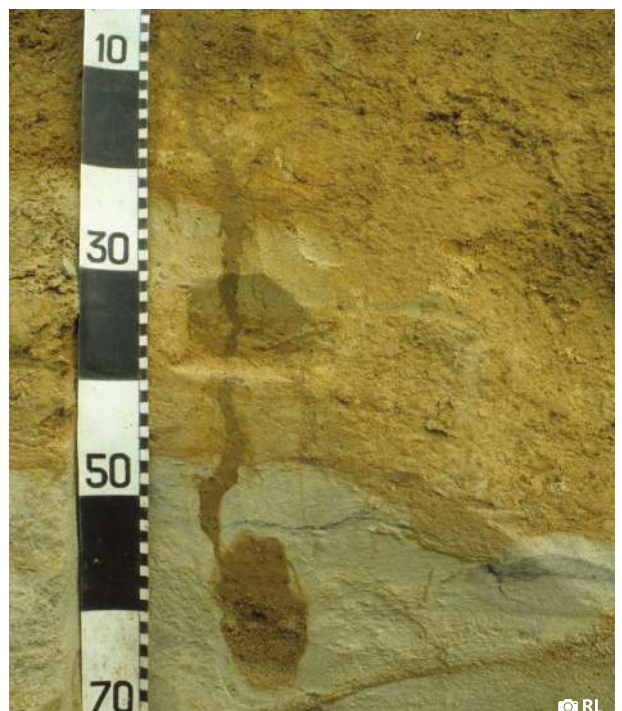


Fig. G83: Een druppelbodem of druipstaartstructuur in löss. Oostelijke leemstreek, België.

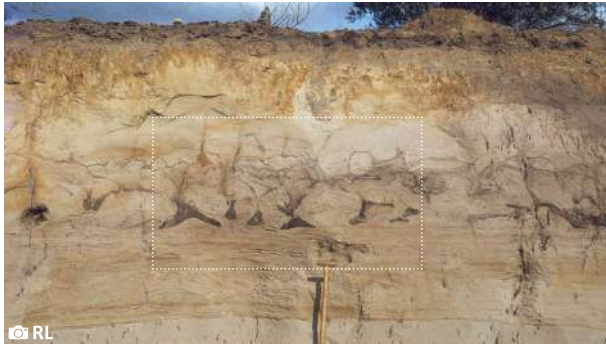


Fig. G84-G85: Een humusrijke zandige bodemhorizont volledig verstoord door kryoturbatie in de actieve laag. De onderkant van de 'ganzenpootmorfologie' toont tot waar de actieve laag reikte en stopt op de bovengrens van de permafrost. Vlaamse Vallei, provincie Oost-Vlaanderen, België. (De Moor, 1983).



Fig. G86-G88: Druppelbodems in zand. Noord-Duitsland.

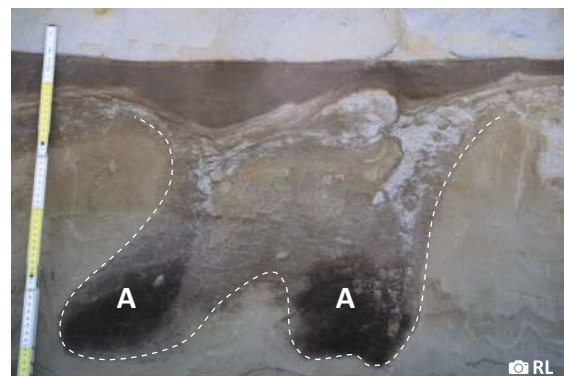
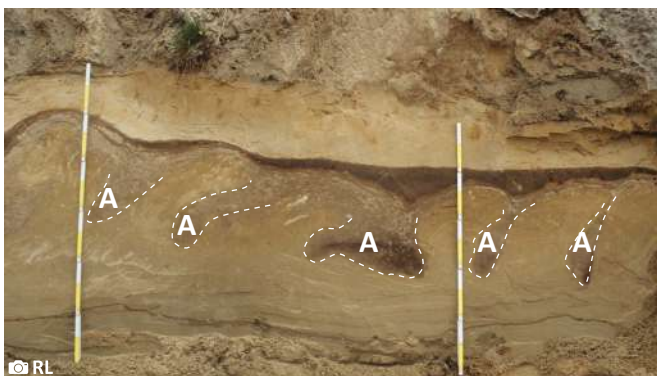
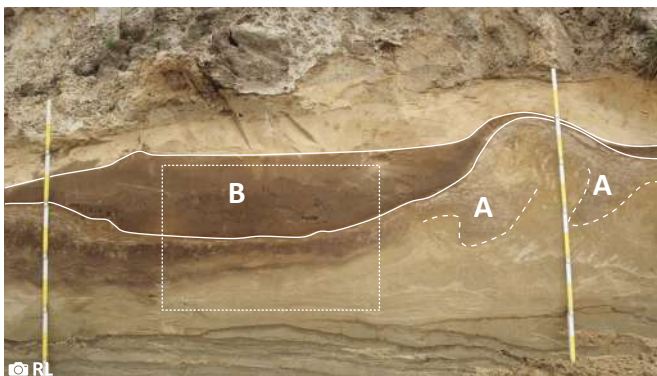


Fig. G89-G92: Vier faciësen van de gekryoturbeerde Usselo-bodem ontwikkeld onder water.

Fig. G89-G90: De homogene bruine horizont in de bovenste helft is waterhard (B) (doppleriet) afkomstig van een hoger gelegen veenlaag.

Fig. G91-G92: Tijdens de Jonge Dryas bereikt in ondiepe meren het vries/dooi proces, de meerbodem. Door kryoturbatie wordt er plaatselijk een druppelbodem – druiptstaartbodem (A) gevormd. De homogene bruine horizont boven de Usselo-bodem is waterhard (doppleriet) (B). Verrebroek, Beveren, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Louwagie & Langohr, 2005).

3. Permafrost

3.1. Inleiding

Permafrost ontstaat wanneer de bevroren bodem tijdens de zomerperiode niet meer volledig ontdooit. Algemeen wordt aangenomen dat de bodem gedurende minstens twee opeenvolgende jaren een temperatuur heeft lager dan 0 °C (Jones *et al.*, 2010: 20). Een bodem met permafrost kan men opdelen in vier zones (figuren G93, G94):

- een bovenste deel dat elk jaar dooit, de 'opdooilaag' of **actieve laag** (En.: *active layer*) (fig. G94);
- de permafrost, een permanent bevroren horizont, die grotendeels waterondoorlatend is;
- een niet bevroren bodem onder de permafrost die zeer sterk uitdroogt door de capillaire zuigkracht van de permafrost die gans het jaar aanwezig is;
- de nog diepere bodemhorizonten of lagen die niet meer worden beïnvloed door de periglaciale processen.

De dikte van de **actieve laag** is hoofdzakelijk afhankelijk van een reeks milieufactoren:

- het klimaat,
- de dikte van het sneeuwdek,
- de vegetatie,
- de hellingspositie,

- de bodemtextuur: hoe grover de textuur, hoe dikker de actieve laag (figuren G98, G104),
- de hoeveelheid water aanwezig in de bodem: hoe droger de bodem, hoe dikker de actieve laag (figuren G98, G101, G104).

De permafrost bezit zowel een boven- als ondergrens. De bovengrens van de permafrost noemt men de permafrosttafel en komt overeen met de maximale onderzijde van de opdooilaag.

Permafrost is grotendeels waterondoorlatend, zodat het bodemvochtregime totaal verandert. Eens er een permafrost is ontwikkeld, kan het water niet meer naar de diepere bodemhorizonten percoleren. Als gevolg hiervan kan de actieve laag gedurende lange perioden grote hoeveelheden water bevatten. Tijdens de volgende vorstperiode begint de actieve laag vanaf het bodemoppervlak te bevriezen. Zo ontstaat er door het zwellen van het ijs een sterke interne druk. Hierdoor vormt er zich een golvend bodemoppervlak. Op vlakke terreinen vormen er zich **bulten** omgeven door microdepressies (En.: *hummocks*), op hellingen vormen er zich min of meer evenwijdige **strepen** (En.: *relief stripes*), die hellingafwaarts verlopen en een golvend verloop hebben. Deze bodems vormen een belangrijk geomorfologisch kenmerk van de regio's met permafrost die ongeveer een vijfde van alle continenten beslaan (figuren G57-G68) (Campy & Macaire, 2003: 177; Jones *et al.*, 2010: 20).

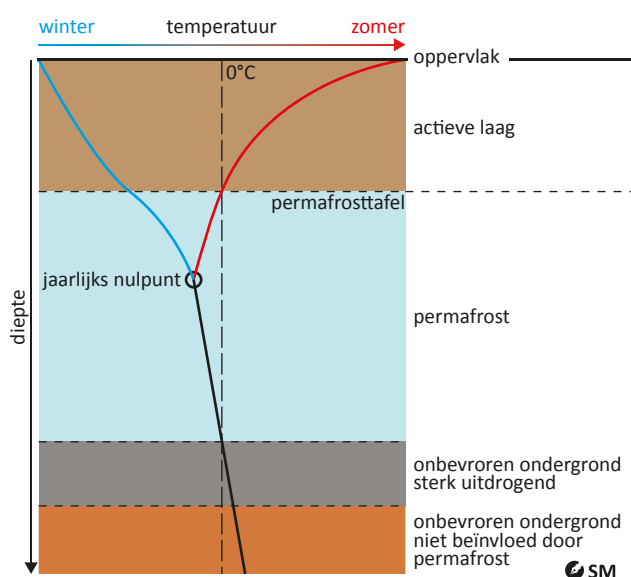


Fig. G93: Jaarlijks verloop van de temperatuur in een bodem met permafrost. De diepte waarop er geen jaarlijkse fluctuatie van de bodemtemperatuur meer is (jaarlijks nulpunt), is de grens tussen permafrost met en zonder jaarlijkse temperatuurschommelingen. (French, 2007).

Fig. G94: Bodem met permafrost en actieve laag tussen 0-30/48 cm. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.

3.2. Ontwikkeling van een fragipan: een onderschatte bodemkundige proxy voor permafrost

Het zijn vooral geologen en geomorfologen, zowel nu als vroeger, die de verspreiding van permafrost opsporen (e.g. Tricart & Cailleux, 1961; Tricart, 1967; Washburn, 1979; French, 2007). Veel aandacht gaat hierbij uit naar morfologische kenmerken die aan het bodemoppervlak voorkomen zoals bijvoorbeeld polygonale structuren, een golvende topografie

(*hummocks*), ijswigkenmerken, solifluctielobben en kryoreptatievormen. Bodemkundigen gebruiken het voorkomen van een **fragipan** in de bodem om de vroegere aanwezigheid van permafrost aan te tonen (Van Vliet & Langohr, 1981). De meeste handboeken over permafrost belichten echter dit aspect nauwelijks.

Fig. G95: De vorming van de fragipan. (bron: R. Langohr).

P0: Oorspronkelijke bodem onder bos, gevormd tijdens de Bølling en de Allerød interstadialen, twee warmere periodes van het Laatglaciaal. Het bodemprofiel bestaat uit een humusrijke A-horizont, een biologisch actieve bruine B-horizont (B β), een B-horizont met klei-aanrijking (Bt) of kleur/structuur B (Bw) en het moeder materiaal, dekzand van het Laatglaciaal (C).

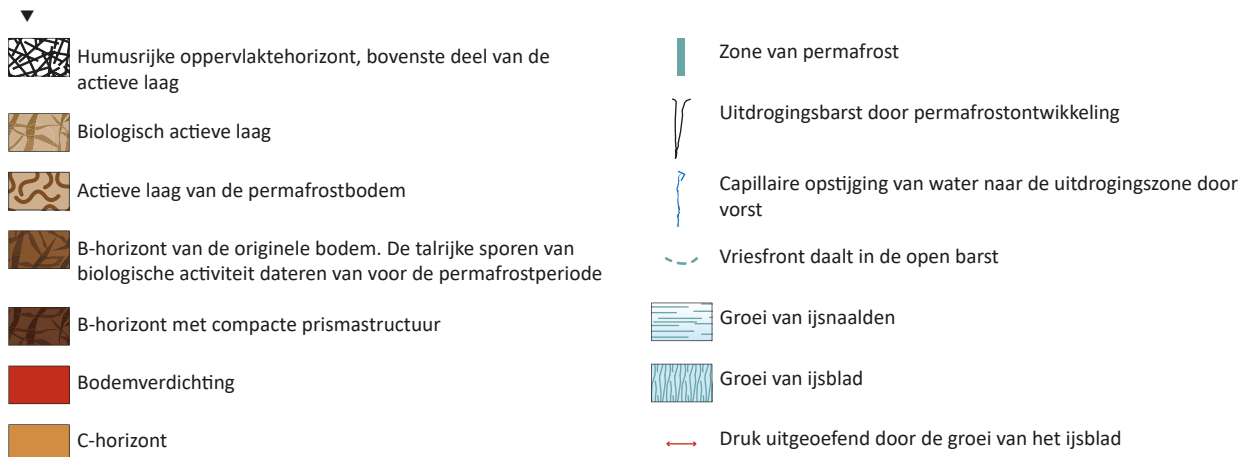
P1: Tijdens de Jonge Dryas wordt het klimaat steeds kouder, de permafrost begint zich te vormen onder de actieve laag. De capillaire zuigkracht trekt water naar het vriesfront. Onder de permafrost droogt de bodem zeer sterk uit en ontwikkelen er zich uitdrogingsbarsten.

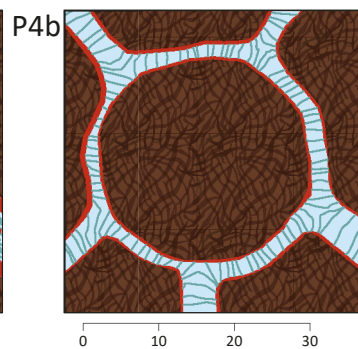
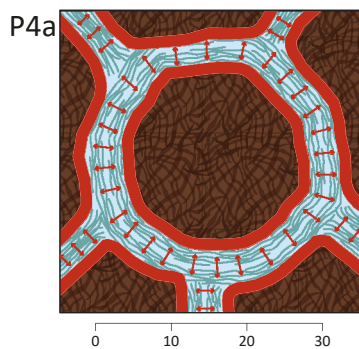
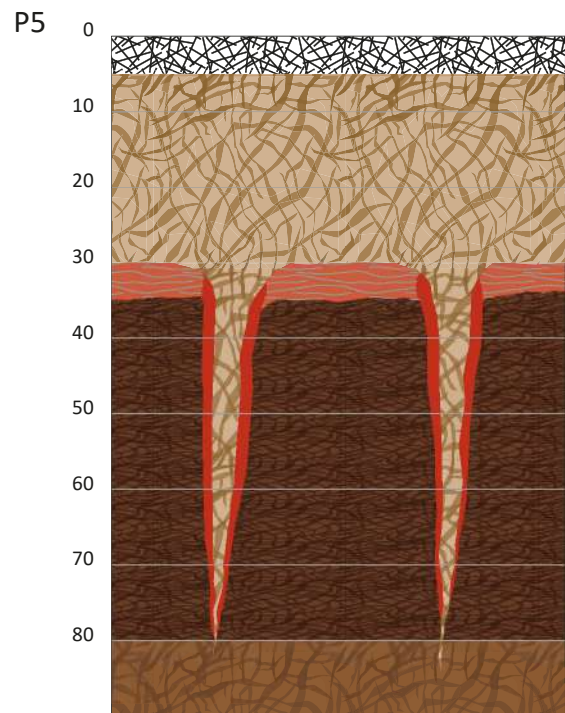
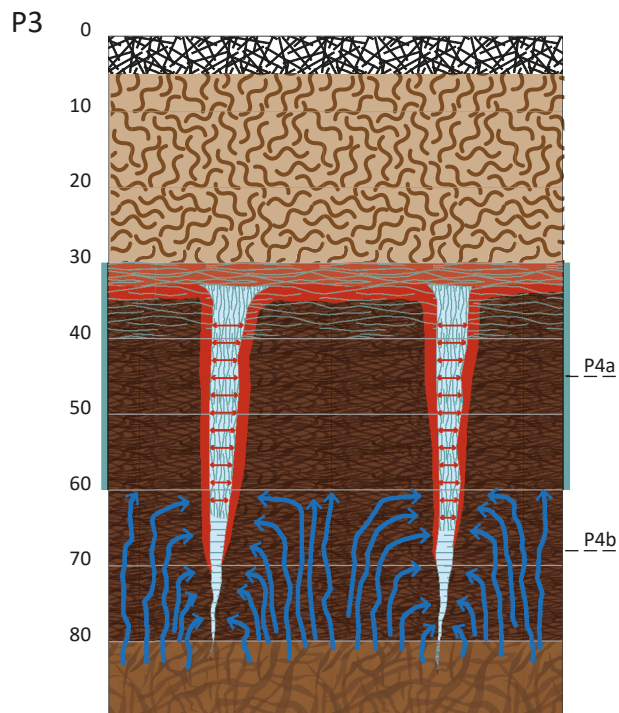
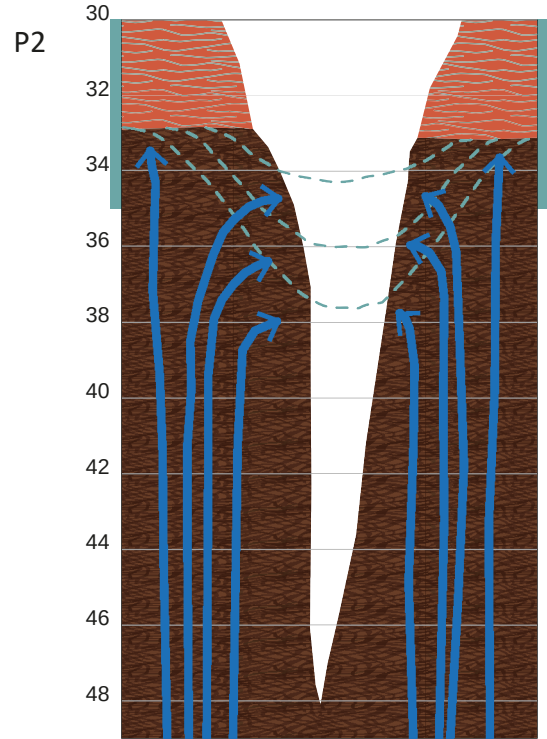
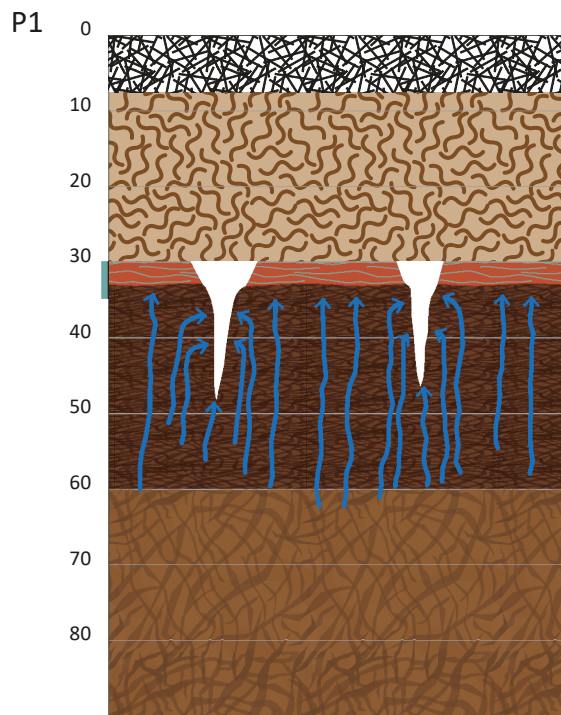
P2: Detail van P1: het vriesfront daalt dieper in de open barsten dan in de omringende bodem.

P3: Naarmate de permafrost langer aanhoudt, zakt het vorstfront dieper in de bodem en dalen de uitdrogingsbarsten dieper. Door steeds meer watertoevoer naar de barsten, veranderen de ijsnaalden in ijsbladen. Het groeiende ijsblad oefent een sterke druk uit op de nog niet bevroren prisma's waardoor de wanden verdichten. Een deel van de poriën en de biogalerijen in de prisma's worden samengedrukt waardoor de barsten breder worden.

P4a: Horizontaal vlak op 45 cm diepte doorheen de bevroren bodem met een ijsblad dat druk uitoefent op de prismawanden. Hierdoor worden de barsten breder. P4b: Horizontaal vlak op 68 cm diepte doorheen de bevroren bodem met de ontwikkeling van ijsnaalden.

P5: Na de vorstperiode zijn de bodemkenmerken veranderd: de ijsbladen zijn gedood en de aarde van de actieve laag zakt in de open barsten. De wanden van de prisma's zijn sterk verdicht, waardoor de wortelgroei zich beperkt tot het barstensysteem. Ook de waterpercolatie vindt grotendeels plaats door het open barstensysteem. Dergelijke bodemhorizont noemt men een fragipan. ►





Eens er in een bodem permafrost is gevormd, kan het water niet meer naar de diepere bodemhorizonten percoleren (figuur G95: 1-2). Tegelijkertijd zal de permafrost, die geleidelijk dieper in de bodem dringt, een sterke zuigkracht uitoefenen op het bodemwater in de diepere bodemhorizonten die nu afgesloten zijn van de watertoevoer uit de actieve laag. Hierdoor ontstaat er een extreme uitdroging van dit diepere deel van de bodem. Als gevolg hiervan kan er, in functie van textuur en vochtigheidsgraad, een sterke krimp ontstaan. De krimp is het meest uitgesproken in bodems met een fijne textuur en een hoge vochtigheidsgraad. Er worden barsten gevormd, die op een horizontaal vlak een prismatisch patroon vormen (figuren G98-G108). De onderzijde van de permafrost groeit steeds verder aan, omdat er steeds meer water vanuit de diepere lagen wordt aangetrokken en door de prisma's naar boven stijgt.

Ter hoogte van de open krimpscheuren, die de prisma's begrenzen, kan het vriesfront dieper in de bodem dringen. Het water dat door de prisma's naar boven stijgt, zal migreren naar het dichtstbijzijnde vriesfront, dit wil zeggen naar de barsten rond de prisma's. Wanneer het water dit vriesfront bereikt, zal het bevriezen, eerst als ijsnaalden die loodrecht op de prismawanden staan (figuur G95: 3). Later, naarmate er steeds meer water de barsten bereikt, vormt er zich een compact ijsblad dat gaandeweg druk gaat uitoefenen op de nog-niet-bevroren prisma. Hierdoor ontstaat er een zeer compacte prismawand (figuur G95: 3). Op een horizontaal vlak krijgt deze prismastructuur het uitzicht van een vijf/zeshoekig patroon (figuur G95: 4a-4b). Deze structuur krijgt de naam van **netvormige ijsbladen** of **'reticulate ice veins'** (figuren G96, G97) (Mackay, 1974). Indien de bodem aanvankelijk zeer poreus

was ter hoogte van de prisma's, kunnen de netvormige ijsbladen een dikte van meerdere centimeters bereiken. Dergelijke afmetingen kunnen niet door een gewone uitdroging ontstaan (fig. G99).

Naarmate de permafrost verder in de bodem dringt, zal dit proces zich dieper voortzetten met prisma's die meerdere meters diep gaan (figuren G98, G99). In de Belgische leemstreek reikt de fragipan doorgaans tot een diepte van 120 cm onder het maaiveld (figuren G98, G101); op het Ardens plateau kan dit tot 150-160 cm diepte gaan (Bock *et al.*, 2010) (figuur G106).

De afmetingen van de prisma's zijn een functie van de vochtigheidsgraad en textuur van de originele bodem. Indien er weinig water aanwezig was, zullen de prisma's van de permafrost op een grotere diepte beginnen en een grotere diameter vertonen (tot 60- 80 cm) (figuur G103). Bij de vorming in natere omstandigheden liggen de prisma's ondieper en vertonen ze een kleinere diameter, soms minder dan een decimeter (figuren G101, G102). In zandige bodems die minder water kunnen ophouden, zullen de prisma's dus dieper liggen en groter zijn in vergelijking met de prismastructuur van de leembodems (figuren G104, G105). *(Let op, deze krimpscheuren zijn te wijten aan uitdroging en niet aan thermische krimp die prisma's kunnen vormen van meerdere meter in doorsnede! – zie § 3.3).*

Na afloop van de permafrostperiode dooien de verticale ijsbladen. Er ontstaan open barsten die langzaam gevuld worden met aarde van de actieve laag (dikwijls een klei-uitlogingshorizont). Het resultaat is een bodem met een opvallende prismastructuur met een abrupte bovengrens en met sterk verdichte prismawanden. De prisma's zelf zijn begrensd door de barsten die nu opgevuld zijn met



Fig. G96-G97: *Reticulate ice veins* met prismastructuur ontwikkeld door permafrost in een recent afgezette kleiige leem (fig. G96) en lemige klei (fig. G97). Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada. (Mackay, 1974).

bodemmateriaal afkomstig van een hogere horizont (figuur G95: 5). Vanaf dan volgen water en wortels de opgevulde barsten, omdat de prisma's zodanig compact geworden zijn dat de wortels er niet in kunnen groeien. Het beschikbare bodemvolume voor de wortels is nu sterk beperkt en bedraagt slechts enkele procenten van het totale bodemvolume (figuur G102).

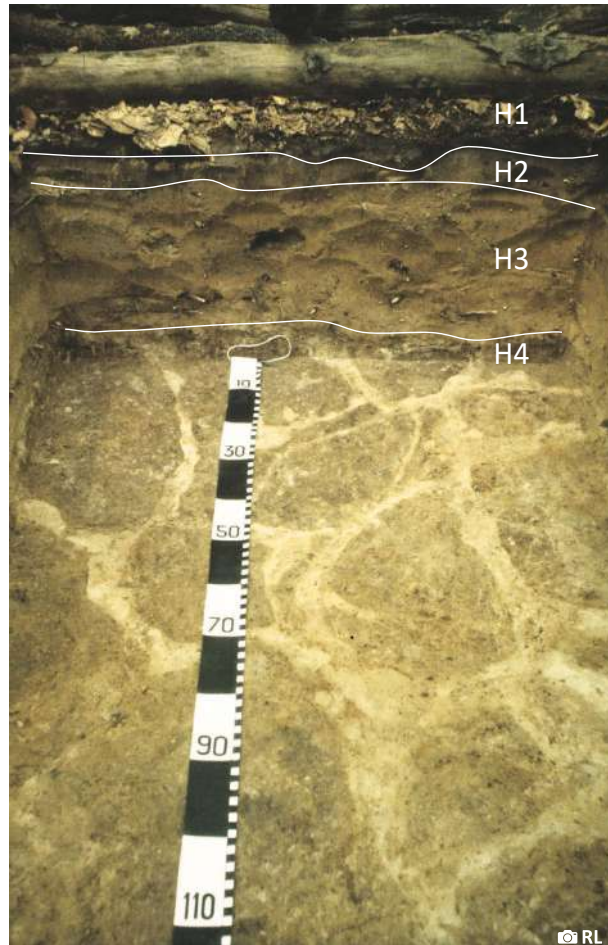
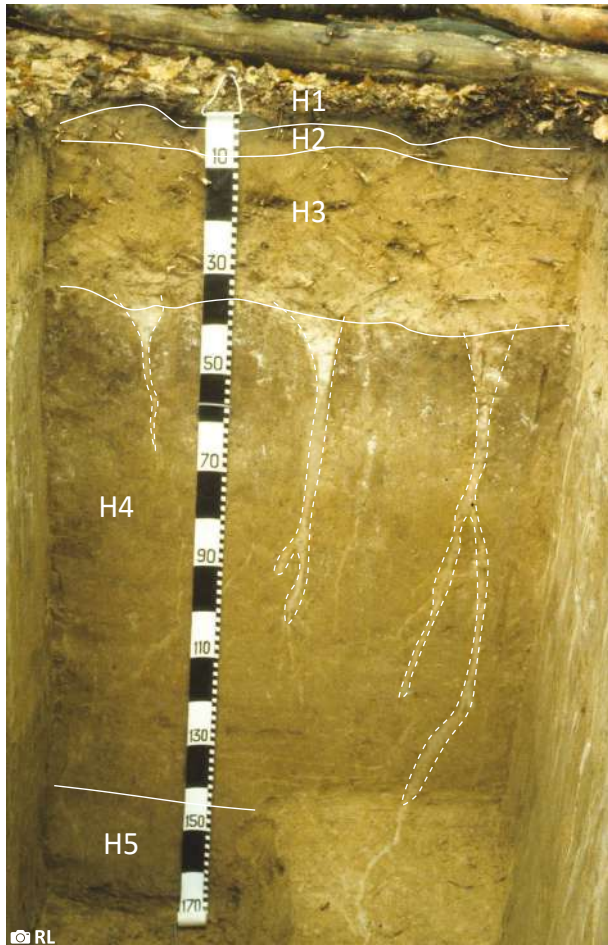
Deze bijzondere prismastructuur is te vergelijken met een gesloten doos ('*closed box system*') (IUSS Working Group WRB, 2022: 47) en vormt dus een sterke beperking voor de plantengroei (figuur G100). Om deze eigenschap in een bodemclassificatiesysteem te kunnen opnemen, hebben de bodemkundigen de naam 'fragipan' aan deze bodemhorizont gegeven. De aarde van deze horizont is breekbaar, compact maar niet gecementeerd (Latijn: *frangere*: breken; ' Latijn: *fragilis*: broos) en 'pan' wegens de sterke wortelbeperking. De term 'pan' wordt gebruikt om een laag/horizont in de bodem aan te duiden die sterk verdicht of verhard is of een zeer hoog kleigehalte heeft. Deze laag belemmert wortelgroei en waterinfiltratie (Soil Science Society of America, 2008).

In België was de fragipan horizont in het begin van het Holocene wijdverspreid in de leem-, zandleem- en lemig-zandstreek. Aangezien de fragipan de klei-aanrijkingshorizont (Bt) die zich in de Bølling en Allerød perioden van het Laatglaciaal had ontwikkeld, doorkruist, wijst dit erop dat de permafrost hoogst waarschijnlijk in de Jonge Dryas kan gesitu-

eerd worden. Tijdens deze periode was het klimaat opnieuw koud en droog (zie § 1.4) (e.g. Van Vliet & Langohr, 1981, 1983; Langohr & Vermeire, 1982). Over uitgestrekte gebieden is de fragipan vandaag niet meer aanwezig. Vooral de zeer sterke bioturbatie van grote regenwormen en mollen op goed bemeste en bekalkte landbouwgronden, heeft ervoor gezorgd dat de fragipan hier volledig is verdwenen. Het is slechts in bosbestanden met een zure bodem en die een minimum van landbouw hebben ondergaan, dat de fragipan nog te observeren is. Het Zoniënwoud, met lemige, zeer zure bodems die nooit onder landbouw zijn gekomen, vormt hiervoor een unicum voor West-Europa. De fragipan is hier al te observeren vanaf een diepte van 30-50 cm (figuren G98, G101). De mate waarin de fragipan bewaard is, vormt dus een proxy voor de intensiteit van menselijke invloed op deze bodems.

Naast de hypothese van permafrost voor de ontwikkeling van een fragipan (e.g. Payton, 1992, 1993a, b; Van Vliet & Langohr, 1981), bestaan er meerdere andere hypothesen, bijvoorbeeld bodemconsolidatie door vocht/droog cycli (e.g. Smalley & Davin, 1982; Bryant, 1989; Smalley *et al.*, 2016), lichte cementatie door siliciumverbindingen (e.g. Bridges & Bull, 1983) en vooral 'bodemdegradatie' met verzuuring en kleiafbraak. Een goed overzicht van kenmerken en genese van fragipans is te vinden in Smalley & Davin, 1982 en Schaetzl & Thompson (2015: 346-356).

Impact van permafrost op een gevormde bodem – ontwikkeling van een fragipan (figuren G98-G108)



H1: A: slechts enkele cm dik, wat wijst op een zeer beperkte activiteit van borende dieren (regenwormen, mollen...).

H2: A β : dunne overgangshorizont.

H3: B β : biologisch actieve horizont, talrijke wortels.

H4: Btx: fragipan horizont met scherpe bovengrens. Het horizontaal vlak toont het polygonaal patroon van de originele krimp-scheuren.

H5: Bt: diepere horizont zonder kenmerken van de fragipan.

Fig. G98-G99: Fragipan (30-120/140 cm) ontwikkeld in een reeds bestaande klei-illuvatie horizont (Bt). Zure leembodem, matig gedraineerde depressiepositie. Fig. G98: Verticale profielwand. Fig. G99: Horizontaal vlak. Zoniënwood, Ukkel, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België. (Langohr, 2016).



Fig. G100: Ter hoogte van de fragipan kunnen de boomwortels slechts langs het oude barstensysteem in de bodem dringen. Deze speciale prismastructuur verlaagt sterk de fysische fertiliteit van de bodem. Zoniënwood, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België. (Langohr, 2016).



Fig. G101-G102: Fragipan in een slecht gedraineerde leembodem door de aanwezigheid van stagnerend grondwater op een kleilig tertiair substraat (niet op figuur), plateaupositie. Fig. G101: Verticale profielwand. Fig. G102: horizontaal vlak. De fragipan is ondieper en het polygonenpatroon veel fijner (vergelijk met fig. G98-G99). Zoniënwoud, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België. (Sanders *et al.*, 1985; Langohr 2016).



Fig. G103: Fragipan ontwikkeld in lemig zand. Goed gedraineerd, plateaupositie. De fragipan begint vanaf 73 cm diepte. Zoniënwoud, België.



Fig. G104: Fragipanstructuur met grote prisma's in zand; op 150 cm diepte volgen de wortels het polygonaal barstenpatroon. Vlaamse Vallei, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. G105: Fragipan in leem (löss) vanaf 67 cm diepte. Bosreservaat, South Island, Nieuw-Zeeland.

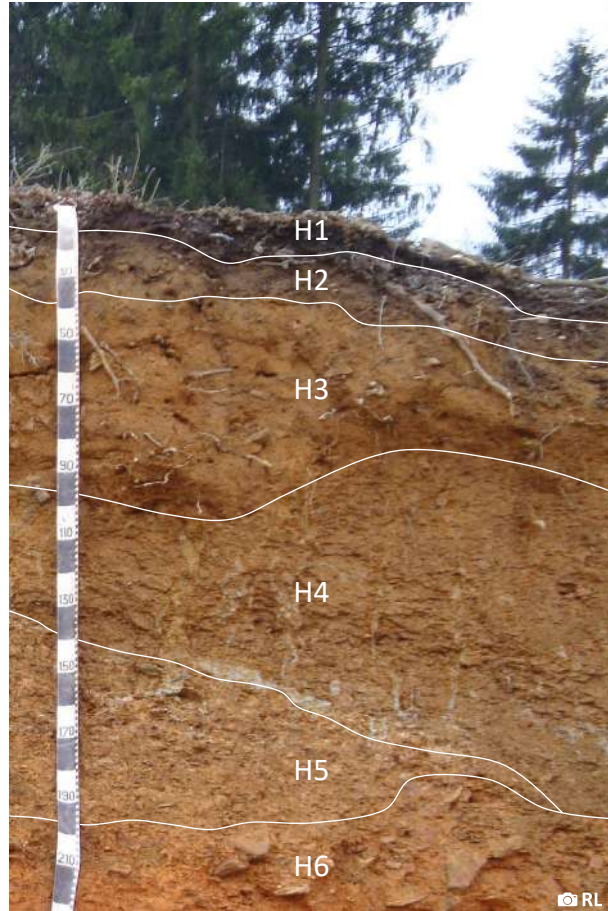
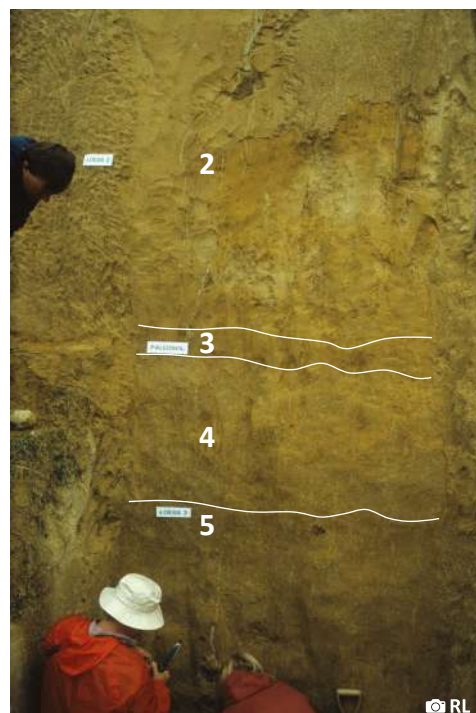


Fig. G106: Sporen van een fragipan tot 1,7 m diep ontwikkeld in löss, bestaande uit een humusrijke A-horizont (1), een humusrijke B-horizont (2), een biologisch actieve B β -horizont (3) met veel wortelgroei. Eronder is er een Btx-horizont ook fragipan (4) genoemd, H5 is de C-horizont en H6 het stenige *in situ* substraat. Transinne, provincie Namen, België. (Bock *et al.*, 2010).

Fig. G107-G108: Een meer dan zes meter diep bodemprofiel in löss. Onderaan is er een bodem ontwikkeld (3-5) met een begraven oppervlaktehorizont (3), een begraven E-horizont (4) en een kleiaccumulatiehorizont met een fragipan (5). De originele bodem is begraven onder twee jongere lössafzettingen (1-2). South Island, Nieuw-Zeeland.



3.3. Ontstaan van ijswiggen

Permafrostbodems met ijswiggen (figuren G109, G110) komen vandaag voor in regio's met een gemiddelde jaartemperatuur van de lucht onder de $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ in leembodems en onder de $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ in zandbodems (Pissart, 1987: 34). De vorming van ijswiggen hangt samen met de thermische expansie/contractie (7) van de permafrostbodem (Murton, 2007).

Ijswiggen beginnen zich te vormen in de winter, wanneer heel de bodem bevroren is. De bodem gedraagt zich als een vaste stof, net als een gesteente. Door de zeer lage wintertemperatuur treedt er thermische krimp op met het ontstaan van lange fijne barsten die vanaf het bevroren bodemoppervlak beginnen. Dit barstenpatroon krijgt de vorm van polygonen met een diameter die meestal groter is dan 10 meter (figuren G109-G111). In de lente, wanneer de actieve laag dooit, zal water de barstjes vullen en bevriezen ter hoogte van de permafrost. Tijdens de volgende zomer/winter cycli herhaalt het proces zich telkens met een geleidelijke groei van de ijswig die opgebouwd is uit talrijke fijne verticale ijsblaadjes (figuren G112-G114). Door deze groei gaat de ijs-

wig druk uitoefenen op de omringende permafrostbodem en wordt de bodem omhooggedrukt langs de randen van de ijswig. Aan het oppervlak ontstaat een ruggetje dat de polygonen afbakent. In het midden van de rug ter hoogte van de ijswig zelf, komt er dikwijls een microdepressie voor (figuren G15, G109-G114, G176).

Ijswigvorming is het meest uitgesproken in bodems bedekt door een dun sneeuwdek (weinig isolatie) onder een continentaal klimaat. Een continentaal klimaat is droger en er zijn, in tegenstelling tot een meer oceanisch klimaat, grotere temperatuurverschillen tussen winter en zomer. Hoe groter het verschil tussen zomer- en wintertemperatuur, hoe sterker het proces van ijswigvorming zich zal manifesteren. Omdat ijs de grootste thermische uitzettingscoëfficiënt (7) heeft, zal een ijsrijke permafrostbodem sterker krimpen in de winter. Ijswiggen komen dus veel voor in depressieposities (figuren G109-G111).

Continue permafrost met de ontwikkeling van ijswiggen (figuren G109-G121)



Fig. G109-G110: Topografie gekenmerkt door actieve ijswiggen links met een centrale depressie, rechts met een bolvormig centrum. De ijswiggen vormen zich voornamelijk in depressieposities waar de bodem veel water bevat. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.



Fig. G111: Centraal op de foto bestaat het landschap uit ijswiggen; aan de horizon liggen twee gigantische pingo's. Grens van de Arctische Oceaan, Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.



Fig. G112: Een aaneenschakeling van ijswiggen (grijze glanzende vlakken). Fairbanks, Alaska, USA.



Fig. G113: Een 4 m diepe ijswig duidelijk opgebouwd uit verticale ijsbladen. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.



Fig. G114: De actieve laag is hier 35 cm dik, met een open barst ter hoogte van ijswig. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.



Fig. G115: Ijswigpseudomorf in zandige afzettingen, met laterale inzakkingen. Vlaamse vallei, provincie Oost-Vlaanderen, België.

Wanneer het klimaat terug opwarmt, dooien de permafrost en de ijswiggen. Grond van de actieve laag en van eventueel nieuw aangevoerde sedimenten, zullen de ijswig opvullen. Zo'n opgevulde fossiele ijswig noemt men een **ijswigpseudomorf** (En.: *ice wedge cast*) (figuren G115-G121). Ter hoogte van de ijswigpseudomorf groeien de wortels veel dieper, omdat de omliggende bodem verdicht is (figuur G116, G117). Deze structuren zijn op (schuine) luchtfoto's te zien aan de hand van gewasmarkeringen (En.: *crop marks*). Naargelang de periode van het jaar, de weersomstandigheden, het vegetatietype, de textuur en de bodemvochtigheid, groeit de vegetatie op de plaats van de ijswigpolygonen van het Pleniglaciaal anders (Ghysels, 2001; Heyse & Ghysels, 2003).



Fig. G116: Ijswigpseudomorf in pleniglaciaal dekzand. De wortels (A) dringen diep in de bodem ter hoogte van de ijswigpseudomorf (B). Bovenaan is een humusrijke oppervlaktehorizont ontwikkeld (C) die lokaal is verstoord geweest (D). Knesselare, provincie Oost-Vlaanderen, België.

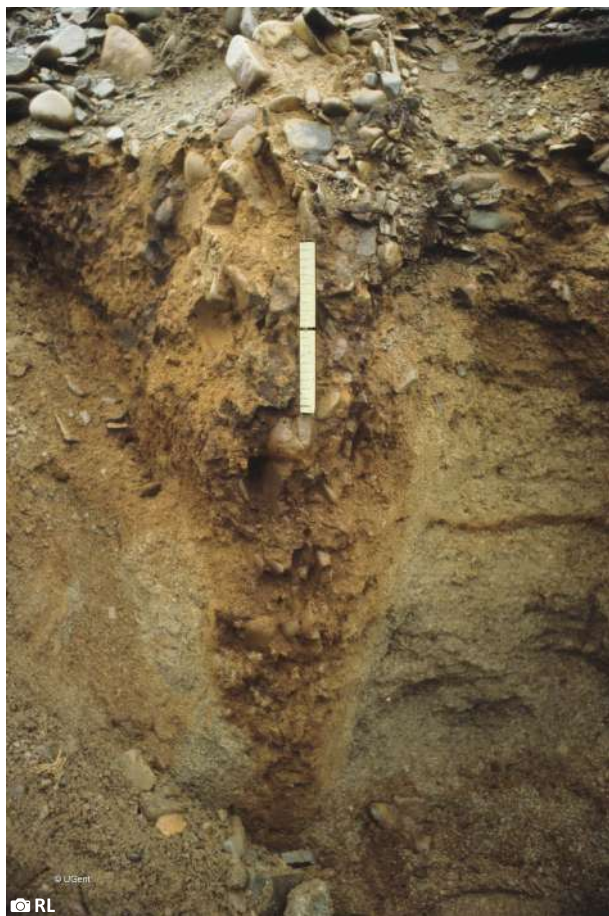


Fig. G117: Ijswigpseudomorf in zand, gevuld met grind. De wortels dringen diep in de bodem en volgen de ijswigpseudomorf. Noord-Noorwegen.



Fig. G118: Ijswigpseudomorf in vroeg-glaciale löss en gevuld met pleniglaciale löss. De kleimigratiebanden zijn goed te zien in de ijswigpseudomorf. Deze banden zijn gevormd nadat het bodemmateriaal is ont kalkt. Dit is geen antropogene structuur! (Zie fig. C3-C4). Vieux-Walleffe, provincie Luik, België.

Fig. G119: Ijswigpseudomorf in vroeg-glaciale löss en gevuld met pleniglaciale löss. Harmignies, provincie Henegouwen, België.



Fig. G120: Ijswigpseudomorf in dekzand, gevuld met humeus zand. Dit wijst er op dat de wortels van de vegetatie preferentieel de ijswig volgen. Torhout, provincie West-Vlaanderen, België. (Deconynck, J. & Laloo, P., 2018).



G121: Ijswigpseudomorf gevormd in glauconietrijk tertiair zand, opgevuld met dekzand. Doornstraat, Brugge, provincie West-Vlaanderen.

3.4. Ontstaan van grondwigen

Grondwigen kunnen zich vormen in zones met of zonder permafrost. De permafrostzones met grondwigen hebben een gemiddelde jaartemperatuur van de lucht onder -4°C (Pissart, 1987: 34). Net als voor ijswigen, zijn ook hier continentale klimaatcondities met sterke temperatuurverschillen tussen winter en zomer nodig. Het verschil met de milieuomstandigheden voor de ontwikkeling van ijswigen is dat voor grondwigen het klimaat veel droger is met weinig of geen sneeuw en dat er tijdens de winterperiode stof of zand wordt verplaatst. Hierdoor zal het jaarlijkse gevormde barstje zich al in de winter vullen met zand of stof (löss) (figuren G122-G128). Na de permafrostperiode zal de zijkant van de wig niet verzakken omdat de wig reeds gevuld is met sediment (zand, löss) dat een verticale stratificatie vertoont.

Grondwigen ontstaan eveneens in droge sneeuwvrije regio's met strenge diepe vorst maar zonder permafrost (French, 2007: 327). Aan de hand van de vorm van de wig is het mogelijk om het onderscheid te maken tussen permafrost en niet-permafrost grondwigen. Wigen ontwikkeld in permafrost eindigen in een puntvorm (figuren G122, G123), wigen ontwikkeld zonder permafrost eindigen in talrijke bladen (figuren G124-G128).

Grondwigen (figuren G122-G128)

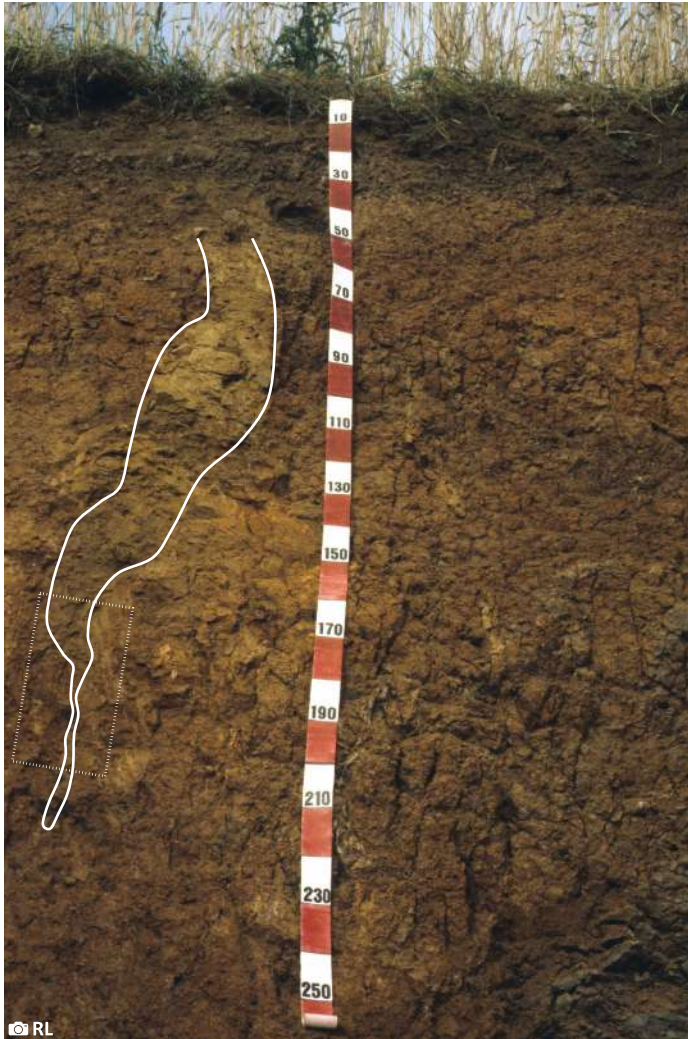


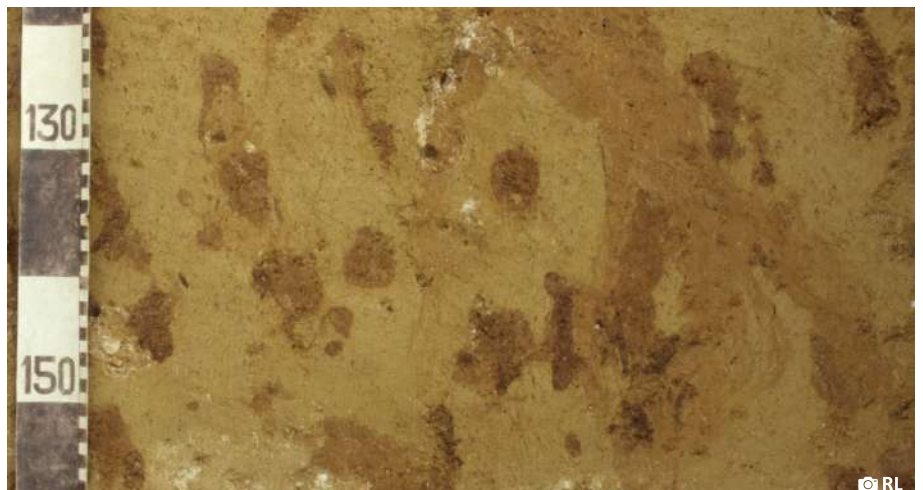
Fig. G122-G123: Grondwig ontwikkeld in bruinrode verweringsklei op kalksteen, gevuld met löss. Condroz, provincie Namen. België. (Van Ranst *et al.*, 2014).



Fig. G124-G125: Grondwig met duidelijke verticale stratificatie. Atlanta, USA.



Fig. G126-G128: Grondwig in löss. In het diepere deel van de wig is deze duidelijk opgesplitst in talrijke verticale aders. Dit wijst op de afwezigheid van permafrost. Hongarije.



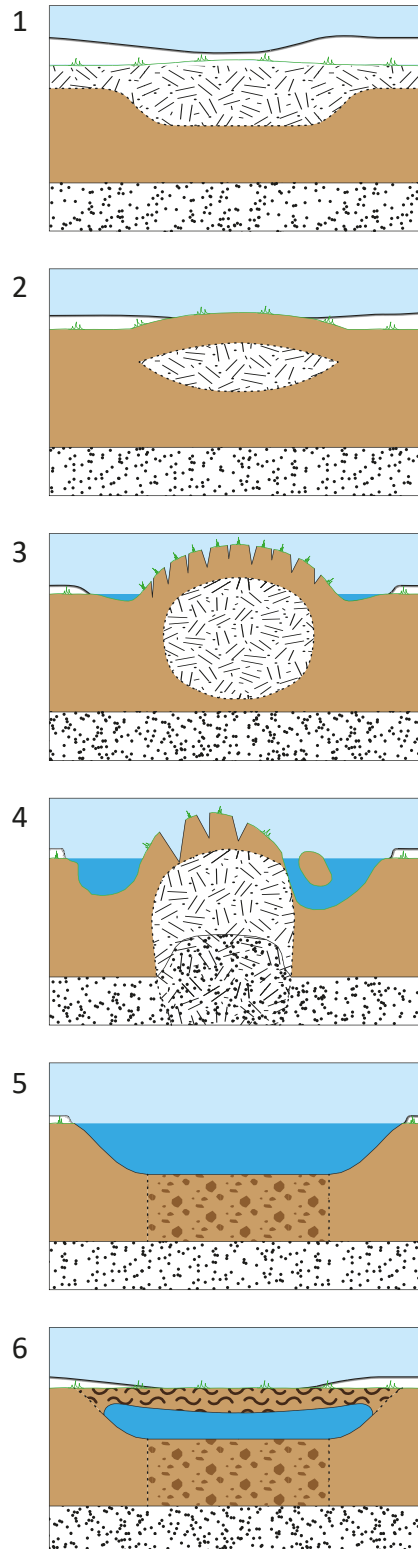
3.5. Ontstaan van palsa's, pingo's en lithalsa's

Palsa's, pingo's en lithalsa's zijn vormen van vorstheuvelds (En.: *frost mounds*).

Palsa's (Fins: grote veenheuvel met een ijskern) zijn over het algemeen heuveltjes die gevormd worden in veengebieden met een discontinue permafrost (figuur G129). Op plaatsen waar het isolerende sneeuwdek dunner is door bijvoorbeeld windactie of een onregelmatige topografie van het veendek, kan de vorst dieper in de bodem dringen waardoor er plaatselijk permafrost ontstaat met de vorming van ijslenzen door ijssegregatie (figuur G131). Op deze plaatsen wordt het bodemoppervlak opgeheven en krijgt de topografie een onregelmatige morfologie van heuveltjes (figuren G130-G135).

Figuur G129 : Op plaatsen met een dunner sneeuwdek, zal tijdens de winter het veen dieper bevroren en zal in deze zone de bodem een beetje opgetild worden (1). Tijdens de zomer smelt door de isolerende veenlaag het diepere deel van het ijslichaam niet (2). In de daaropvolgende winters groeit het ijslichaam verder aan, omdat door de capillaire zuigkracht water uit de omgeving wordt aangetrokken. Hierdoor begint de palsa meer en meer uit te steken ten opzichte van het omliggende reliëf. Op deze hogere zones is de wind meer effectief om het sneeuwdek weg te blazen en het veen aan het oppervlak uit te drogen. Langzamerhand begint het veendek scheuren te vertonen (3). Wanneer het ijslichaam de minerale bodem bereikt, kan de palsa niet verder meer aangroeien. De veenlaag op de palsa scheurt verder, het ijslichaam begint te smelten en rond de palsa vormt er zich een poel (4). Blokken van ontdooid veen glijden van de helling af in de poel en worden verder afgebroken (5). Na enige tijd kan er in de poel nieuwe veenvorming beginnen (6).

(bron: Seppala, 2006: https://www.researchgate.net/publication/266241369_Palsa_mires_in_Finland/figures?lo=1)



Palsa's - Ivalo, Lapland, Finland (figuren G130-G135)



Fig. G130-G131: Waar het sneeuwdek dunner is door de topografie van het veen, kan de vorst voldoende diep in de bodem dringen zodat er permanent bevroren grond ontstaat (fig. G131). Deze permafrost trekt het diepere grondwater aan zodat er een dik ijslichaam ontstaat onder de actieve laag. Het ijslichaam dat steeds verder aangroeit, duwt het bodemoppervlak naar boven.

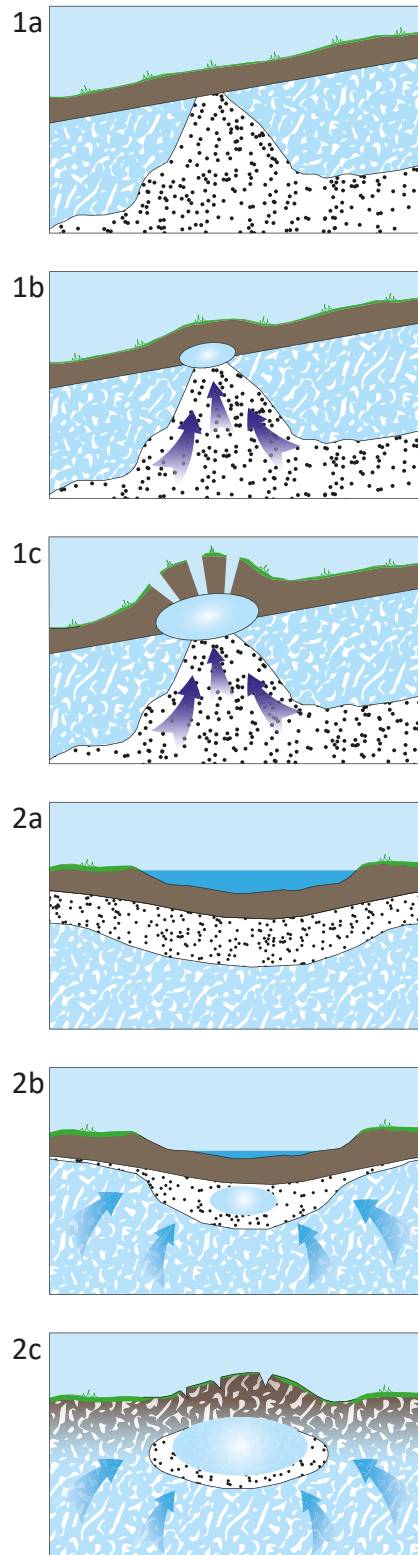


Fig. G132-G133: De vorm van palsa's kan zeer divers zijn.



Fig. G134-G135: De opheffing van het bodemoppervlak kan zo sterk zijn dat er een degradatiefase ontstaat met afbrokkelen van de actieve laag.

Pingo's zijn uit ijs bestaande afgeplatte kegelvormige heuvels die 50 tot 100 m hoog kunnen worden (figuren G137, G138, G140). De pingo's van het 'open-systeem' ontstaan door de groei van een ondergrondse ijsmassa op het contact tussen permafrost en de onderliggende niet-bevroren bodem van waaruit water wordt aangevoerd (figuur G136: 1). De pingo's van het 'gesloten-systeem' houden verband met de aanwezigheid van een *talik* (niet bevroren zone in permafrost) onder bijvoorbeeld een meer (figuur G136: 2). Wanneer een meer leegloopt, bevriest de bodem van het meer en breidt de permafrost zich verder uit. Het water in de *talik* komt onder grote druk te staan en gaat dicht onder het oppervlak bevroren. In beide gevallen duwt de aangroei van de ondergrondse ijskern de grond naar boven, zodat er een heuvel wordt gevormd. Wanneer de helling te sterk wordt, begint de opgeheven bodem naar beneden te glijden. Zo komt de ijsmassa direct in contact met de lucht. In de zomer treedt dan dooi op waardoor stilaan de ijsmassa verdwijnt: dit is de degradatiefase. Het eindresultaat is een **pingoruïne** (En.: *pingo scars*): een dooi-meer, omringd door een hogere wal van de naar beneden gegleden bodem (figuur G139). In vlakke landschapsposities zijn deze meren cirkelvormig, op hellingen zijn ze meer ovaalvormig. In Nederland, provincie Drenthe, bestaan er talrijke pingoruïnes (Van Huissteden & Vandenbergh, 2022: 247-248). Het is niet uitgesloten dat dergelijke structuren ook in Vlaanderen voorkwamen.



Figuur G136: Ontwikkeling van een pingo. 1: het 'open-systeem': (1a) vorming van een ijslichaam op de grens van permafrost en niet-bevroren ondergrond van waaruit grondwater wordt aangevoerd (1b). De aangroei van het ijslichaam duwt de bodem omhoog (1c). De bodem boven het ijslichaam begint te scheuren en glijdt af zodat de ijskern wordt blootgesteld aan de zon en afsmelt. De ijskern verandert langzaam in een watergevulde laagte omgeven door een ringvormige wal. 2: het 'gesloten-systeem' (2a) is typisch voor een *talik* zoals onder een meer of in een alluviale vlakte. (2b) Bij het leeglopen van het meer of het verleggen van de rivier vermindert de isolerende werking van het water en begint de permafrost aan te groeien. Een ijslichaam wordt gevormd (2c) en groeit steeds verder aan door het aanzuigen van water uit de opdoilaag of uit de nog niet bevroren omgeving. De oppervlaktelagen worden door het ijslichaam opgeduwd. (bron: <https://www.coolgeography.co.uk/A-level/AQA/Year%2012/Cold%20environs/Periglaciation/Periglacial%20landforms.htm>)



Fig. G137: Pingo aan de rand van de Arctische Oceaan. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.



Fig. G138: Een pingo in degradatiefase: op de hellingen begint de bodem naar beneden te glijden. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.



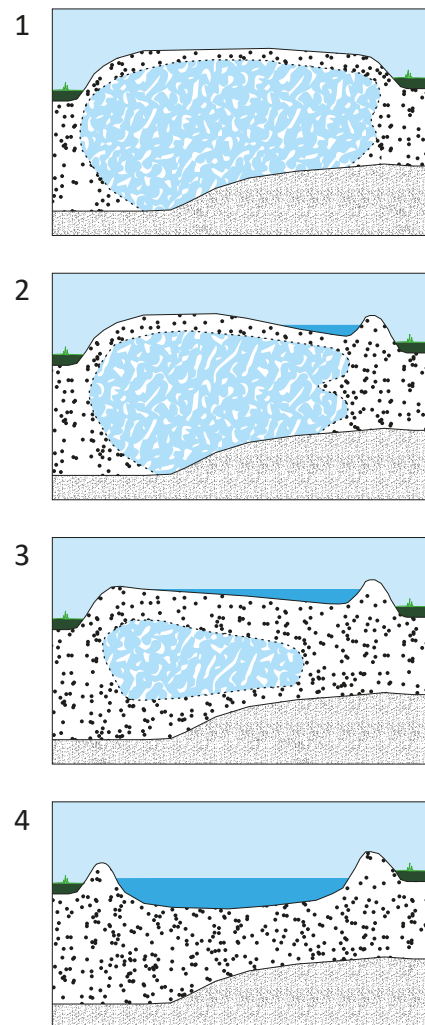
Fig. G139: Pingoruïne, een vorm van thermokarst. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.



Fig. G140: Helling van een pingo in degradatiefase. De hellingsgraad bedraagt ongeveer 35 graden, de grens van stabiliteit. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.

Lithalsa's. Lithalsa's gelijken goed op palsa's wat betreft hun vorm, afmetingen en genese. Lithalsa's hebben in tegenstelling tot palsa's geen veendek en ontwikkelen zich in minerale bodems. Lithalsa's en palsa's hebben een verschillende geografische verspreiding en de morfologie na het afsmelten van het ijs is anders. Van palsa's is na het dooien van het ijs, met uitzondering van een depressie, quasi geen spoor meer te zien. Bij lithalsa's blijft er een lage wal rond een depressie over (figuur G141). De wal is opgebouwd uit sedimenten die door solifluctie zijn afgezet (Pissart, 2013). Deze kleine dooimeren zijn te vergelijken met pingoruïnes. In België treft men lithalsa's aan op het plateau van de Hoge Venen en het plateau van Tailles (figuren G142-G144) (Pissart, 1987: fig. 5.3). Pissart, specialist van periglaciale processen, heeft deze regio's nauwkeurig bestudeerd. Oorspronkelijk definieerde hij de dooimeren als pingoruïnes (Pissart, 1976). Later, na gedetailleerde studies met doorsneden doorheen de wallen (fig. G145-G147), kwam hij tot het besluit dat de structuren eerder aanleunen bij minerale palsa's (Pissart & Juvigné, 1980). Ten slotte stelt Pissart voor ze 'lithalsa's' te noemen (e.g. Pissart, 1995, 2000, 2007). Belangrijk is de datering van deze structuren die mogelijk was dankzij veen van het Allerød interstadiaal begraven onder de aarde die van de ijskoepel was gegleden. Deze talrijke lithalsa's dateren dus van de Jonge Dryas periode, wat zou wijzen op de aanwezigheid van een discontinue permafrost. Dit komt overeen met de gegevens van Isarin (1997).

Fig. G141: Afsmelten van een lithalsa: (1) goed ontwikkelde lithalsa met een ijslichaam; (2) (3) het ijs smelt in de randzone van de lithalsa, het bodemoppervlak zakt in, water verzamelt zich in deze laagte en de aanzet van een lage wal wordt gevormd; (4) de ijskern is volledig gesmolten, enkel een dooi-meertje omgeven door een wal blijft over (bron: Calmels *et al.*, 2008, Pissart 2013).



Lithalsa's - Hoge Venen, provincie Luik, België (figuren G142-G147)



Fig. G142-G143: Zicht op de depressie en de minerale wal van een lithalsa.

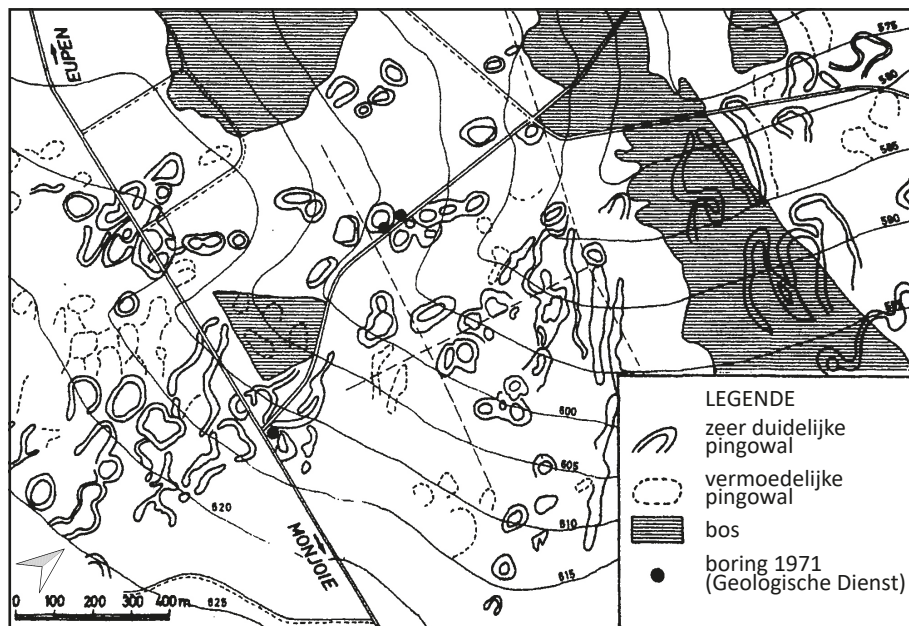


Fig. G144: Kaart met de verspreiding van lithalsa's op de Hoge Venen langsheen de N67 (Eupen – Monschau), Waimes, provincie Luik. (bron: Pissart, 1976).



Fig. G145-G147: Profielen doorheen de minerale wal rond lithalsa's van de Hoge Venen. Het veen onderaan (zwart gekleurde laag) is gedateerd als het Allerød interstadiaal (Pissart & Juvigné, 1980; Bastin, 1985). Dit toont aan dat de lithalsa's gevormd zijn tijdens de Jonge Dryas periode.

4. Erosie te wijten aan vries-dooi al dan niet onder permafrost omstandigheden

4.1. Naaldijs

Zie § 2.1.

4.2. Oppervlakkige kryoreptatie

Kryoreptatie (En.: *frost creep*) is een hellingafwaartse verplaatsing van bodemmateriaal door vorstwerking. Grove elementen op een helling bevriezen sneller dan de bodem (hogere thermische geleidbaarheid - 6, zie § 1.3.) waardoor het bodemwater onder de steen sneller zal bevriezen. De groeiende ijsnaalden tillen de stenen naar boven (figuur G45). Deze ijsnaalden staan loodrecht op het hellend bodemoppervlak, maar bij de dooi zakt de steen verticaal naar beneden. Hierdoor ontstaat er een kleine hellingafwaartse beweging (figuren G42, G43, G148-G151). Men spreekt van 'wandelande stenen' (En.: *ploughing boulders*) (Berthling *et al.*, 2001). Hoe groter de steen, hoe sterker die beweging (figuur G149). Na talrijke vries/dooi cycli ontstaan er zo steenstrepen (En.: *stone stripes*) met een sortering waarbij de grootste elementen het verst bewegen (gesorteerde steenstrepen) (figuren G149, G152). Op plaatsen met een ontsluiting van vorstgevoelig gesteente zoals kalksteen en schiefer - beide zijn redelijk poreus en het geabsorbeerde vocht zet uit bij vorst - kan er op de helling een gelaagd sediment voorkomen van steenfragmenten die ongeveer dezelfde afmeting hebben. De term '**grèze litée**' (En.: *grèzes bedding*) wordt hiervoor gebruikt (figuren G153, G154) (e.g. Bertran *et al.*, 1992).



Fig. G148: Oppervlakkige kryoreptatie. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.



Fig. G149: Oppervlakkige kryoreptatie. De grove elementen liggen verst. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.



Fig. G150-G151: Kryoreptatie. Northwest Territories, Canada.





Fig. G152: Bovenaan de helling liggen er steenstrepen, helling-afwaarts gaan ze over in een accumulatie door oppervlakkige kryoreptatie. De grovere elementen liggen onderaan de helling. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.



Fig. G153-G154: Algemeen zicht en detail van fijn gestratificeerd sediment van versplinterde schiefer (Fr.: *grèze litée*) afgezet door oppervlakkige kryoreptatie. Ardennen, België.

4.3. Interne kryoreptatie

Een tweede vorm van kryoreptatie ontstaat in bodems die bij vorst talrijke ijsbladen vertonen. Deze ijsbladen vormen een plaatstructuur, min of meer parallel aan het bodemoppervlak. Op een helling, zelfs als die maar enkele procenten bedraagt, kan het bodemmateriaal over de ijsbladen naar beneden glijden (figuren G155, G160). In het bodemprofiel is er een gradiënt te zien van een sterke verplaatsing bovenaan in het profiel en minder uitgesproken verbuigingen in de diepere bodemlagen (figuren G156-G160). Interne kryoreptatie kan zeer spectaculair zijn in schiefer waar de gelaagdheid van het gesteente volledig kan omkeren (figuren G161, G162). Deze vorm van periglaciale erosie kan reeds plaatsvinden op zeer zachte hellingen. Het is een veel voorkomend erosie/sedimentatie proces in de Ardennen waar het dikwijls als 'colluvium' wordt beschreven.



Fig. G155: De oorspronkelijke verticale biogalerijen zijn hellingafwaarts verplaatst door fijne ijsbladen die zich parallel aan het oppervlak ontwikkelden. Rocourt, provincie Luik, België.



Fig. G156: Zicht op interne kryoreptatie in een bodem met diverse texturen. Schotland.



Fig. G157: Zicht op interne kryoreptatie in lössbodems. Lichevin, Rusland.



Fig. G158: Zicht op interne kryoreptatie. Les Eyzies, departement Dordogne, Frankrijk.



Fig. G159-G160: Interne kryoreptatie met verstoring van paleobodems. Butsel, Boutersem, provincie Vlaams-Brabant, België. (Sevenants *et al.*, 2009).



Fig. G162: Interne kryoreptatie op schiefer. Vresse-sur-Semois, provincie Namen, België.

◀ Fig. G161: Interne kryoreptatie in de actieve laag op permafrost op 140 cm diepte, schiefer. Ardennen, België.

4.4. Gelifluctie (solifluctie)

Solifluctie is een langzame hellingafwaartse beweging van bodemmateriaal verzadigd met water waarbij typische solifluctielobben worden gevormd. Bij vorst stijgt (grond)water naar de oppervlakkige bodemlagen die bevroren. Hierdoor kan de bevroren bodem een hoeveelheid ijs bevatten die veel groter is dan de oorspronkelijke porositeit. Bij dooi ontstaat er zo een oververzadigde modderige onstabiele bodem (Cailleux & Tricart, 1950). Op een helling, zelfs van amper enkele procenten, kan het bodemmateriaal beginnen te bewegen. De aanwezigheid van een waterondoorlatende permafrost vergemakkelijkt dit proces. Deze beweging kan de horizonatie en/of gelaagdheid van de bodem

volledig verstoren (figuren G163-G168). De term '**gelifluctie**' wordt verkozen wanneer dit proces optreedt in periglaciale omstandigheden, 'solifluctie' kan ook onder andere milieucondities optreden (Baulig, 1956; French 2007: 225). In de Ardennen heeft men dikwijls de term 'solifluctie' gebruikt bij de beschrijving van periglaciale erosie. In werkelijkheid zijn het vooral vormen van interne kryoreptatie zoals beschreven in vorige paragraaf.



Fig. G163: Uitgesproken gelifluctie van een bodem met oorspronkelijk een humusrijke oppervlaktehorizont. Nederland.



Fig. G164: Actieve solifluctie op de wand van een lössgreove. Overijse, provincie Vlaams-Brabant, België.



Fig. G165-G166: Gelifluctielobben op een helling in een toendra. Detail van een gelifluctielob. Personen als schaal. Northwest Territories, Canada.



Fig. G167: Gelifluctielobben op gefragmenteerde kalksteen. Serra del Cadí, Cerdanya, Spanje.



Fig. G168: Gelifluctie; gekantelde bodemfragmenten. Nederland.

4.5. Betreding en brand

Bevroren bodems rijk aan ijssegregatie met of zonder permafrost zijn zeer gevoelig voor betreding of brand. Deze processen vernietigen het vegetatiedek dat sterk isolerend is, waardoor de dooi veel sneller en dieper zal optreden. Bij de aanwezigheid van een ijsrijke permafrost kan dit grondverschuivingen teweeg brengen (Burn, 2007b: 2193). Bovendien is het herstel van het vegetatiedek erg traag door de lage temperaturen en het korte groeiseizoen; dit herstel kan honderden tot duizenden jaren duren (Beyer *et al.*, 1999).

4.6. Nivatie

Een plaatselijke opeenhoping van sneeuw op een concave helling kan terugschrijdende erosie veroorzaken (figuur G169). Hierdoor kan een nis, een 'neve', ontstaan die ongeveer de vorm van een amfitheater heeft (e.g. Christiansen, 1996). Deze morfologie is goed bewaard in de leemstreek waar weinig of geen landbouw is gebeurd zoals bijvoorbeeld in het Zoniënwoud (figuren G11, G170-G172).



Fig. G169: Een 'mini' neve. Het persistente sneeuwdek verhindert de kolonisatie door de vegetatie. Tijdens de dooi treedt er erosie op. Karpaten, Slowakije.

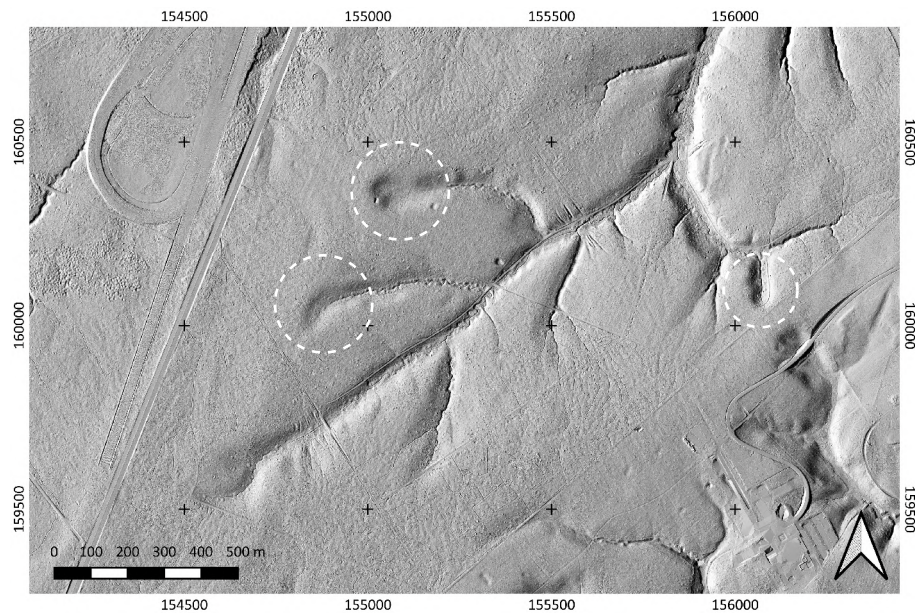


Fig. G170: Typische valleiontwikkeling door een neve met valleioofd in de vorm van een amfitheater, zonder een spoor van een gracht. Zoniënwoud, Groenendaal, provincie Vlaams-Brabant, België. (© Digitaal Vlaanderen).



Fig. G171-G172: Valleiofden in de vorm van een amfitheater. Zoniënwoud, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België. (Langohr, 2016).

4.7. Themokarst

Thermokarst is het proces waarbij landvormen ontstaan door het smelten van grondijs. Hierdoor zakt het bodemoppervlak in en wordt een onregelmatig microreliëf gevormd (niet te verwarren met karst in kalksteenlandschappen!). Meest typisch zijn de dooimeren, maar ook grondverschuivingen, depressies en restanten van ijswiggen en polygoonstructuren zijn vormen van thermokarst (French, 2007; Koster & van der Meer, 2013).

Bij de dooi van een permafrost rijk aan ijs, kan de bodem instorten met de vorming van depressies zoals pingomeren tot gevolg (§ 3.5). Door verdere dooi ondergaan de oevers hiervan terugschrijdende erosie (figuren G12, G13, G173-G175) (Burn, 2007a). Ijswiggen die dooien, tonen een microreliëf met laagtes die een polygoonaal patroon vormen. In de Kempen kan men vandaag nog steeds zo'n landschap waarnemen (figuren G15, G176, G177) (Beerten *et al.*, 2021). In de huidige permafrostgebieden breidt, door de klimaatopwarming, deze vorm van bodemverzakkingen zich uit (e.g. Nelson *et al.*, 2001).



Fig. G173: Plotse thermokarst grondverschuivingen door de dooi van een ijsrijke permafrost. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.



Fig. G174: Actieve thermokarst erosie langs de oever van de Arctische Oceaan. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.



Fig. G175: Stabiele thermokarstmorfologie langs de oever van de Arctische Oceaan. Tuktoyaktuk, Northwest Territories, Canada.



Fig. G176: Depressies met stagnerend water ter hoogte van een ijswipseudomorf. Lieremans Staartje, Oud-Turnhout, provincie Antwerpen, België.

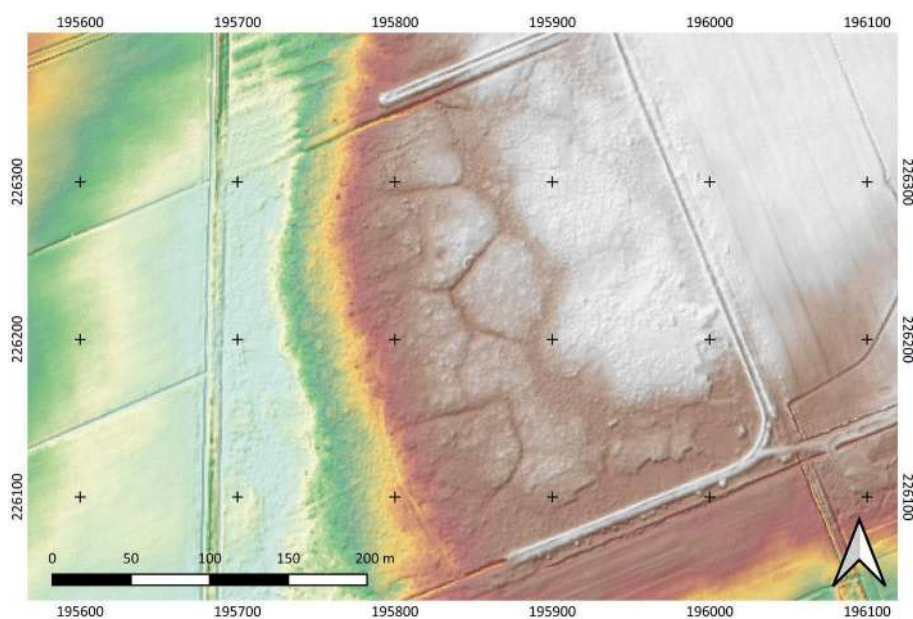


Fig. G177: Digitaal hoogtemodel van het microreliëf veroorzaakt door ijswipseudomorfen. Lieremans Staartje, Oud-Turnhout, provincie Antwerpen, België. (© Digitaal Vlaanderen) (Beerten *et al.*, 2021).

5. Impact van periglaciale processen op archeologische sites

Het is evident dat periglaciale processen in België vooral belangrijk zijn geweest voor de archeologische sites die dateren van het Vroeg- en het Pleistocene. Zowel de archeologische structuren als de verspreiding van de artefacten kunnen sterk verstoord zijn (Bertran *et al.*, 2010). Tijdens het Laatglaciaal is het vooral in de Jonge Dryas periode waar periglaciale processen nog een invloed hebben gehad op de bodemsedimenten. Minder spectaculaire sporen zoals capping op artefacten konden zich echter nog ontwikkelen in strenge vorstperioden van bijvoorbeeld de Kleine IJstijd, vooral op akkerland waar de vorst meerdere decimeters diep kan reiken (Crombé *et al.*, 1991).

REFERENTIES

- Amandry, M., Bécu, B., Bérard, F., Bouchet, Fr., Chaidron, C., Court-Picon, M., Delestrée, L.-P., Deligne, F., Di Vita-Evrard, G., Fechner, K., Fercocq Du Lesnay, G., Harter, S., Le Bailly, M., Langohr, R., Loicq, S., Marchand, Ch., Munaut, A.-V., Brouquier-Reddé, V. & Wyss, S., 2009. *Les temples du sanctuaire gallo-romain de Ribemont-sur-Ancre, Somme* (Ed. Brunaux, J.-L.). Commios Ed., Saint-Germain-en-Lay, 319 pp.
- Ampe, C. & Langohr, R., 2006. Roborst - Steenbakkerij. Uitgewerkt voorbeeld erkenningsdossier Waardevolle Site voor Bodem. In: Project waardevolle bodems in Vlaanderen. Eindverslag. Ampe, C., Bosmans, E., Defrijn, S., Vancampenhout, K. & Wouters, K., 139-148. Vlaamse Overheid, Dienst Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen, 208 pp.
- Ampe, C. & Langohr, R., 2006. Beernem – Het Aanwijs. Uitgewerkt voorbeeld erkenningsdossier Waardevolle Site voor Bodem. In: Project waardevolle bodems in Vlaanderen. Eindverslag. Ampe, C., Bosmans, E., Defrijn, S., Vancampenhout, K. & Wouters, K., 129-137. Vlaamse Overheid, Dienst Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen, 208 pp.
- Andrieux, E., Bertran, P., Antoine, P., Deschodt, L., Lenoble, A. & Coutard, S., 2016. Database of Pleistocene periglacial features in France: description of the online version. *Quaternaire*, 27, 4, 329-339.
- Bastin, B., 1985. Etude palynologique d'une couche de tourbe mise à jour dans le "rempart" d'une "passe" de la Konnerzvenn. *Hautes-Fagnes*, fasc. 179, 72-73.
- Baulig, H., 1956. *Vocabulaire Franco-Anglo-Allemand de Géomorphologie*. Ed. Les Belles Lettres, Paris, 230 pp.
- Beerten, K., Meylemans, E., Kasse, C., Mestdag, T., Van Rooij, D. & Bastiaens, J., 2021. Networks of unusually large fossil periglacial polygons, Campine area, northern Belgium. *Geomorphology*, 377, 14 pp. DOI:10.1016/j.geomorph.2020.107582.
- Berthling, I., Eiken, T. & Sollid, J., 2001. Frost heave and thaw consolidation of ploughing boulders in a Mid-Alpine environment, Finse, Southern Norway. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 165-177.
- Bertran, P., Coutard, J.-P., Francou, B., Ozouf, J.-C. & Texier, J.-P., 1992. Données nouvelles du litage des grèzes : implications paléoclimatiques. *Géographie Physique et Quaternaire*, 46, 97-112.
- Bertran, P., Klairic, L., Lenoble, A., Masson, B. & Vallin, L., 2010. The impact of periglacial processes on Palaeolithic sites: The case of sorted patterned grounds. *Quaternary International*, 214, 17-29.
- Beyer, L., Bockheim, J., Campbell, I. & Claridge, G., 1999. Review. Genesis, properties and sensitivity of Antarctic Gelisols. *Antarctic Science*, 11, 4, 387-398.
- Bock, L., Engels, P., Langohr, R. & Yans, J., 2010. Field trip to Hoyoux valley and Transinne quarry. The Transinne quarry. 7 September 2010, 12-27. Soil Science Society Belgium.
- Bridges, E. & Bull, P., 1983. The role of silica in the formation of compact and indurated horizons in soils of South Wales. In: *Soil Micromorphology. Proceedings of the 6th International Working Meeting on Soil Micromorphology* (Eds. Bullock, P. & Murphy, C.), 605-613. Berkhamsted, AB Academic publishers, 705 pp.
- Bryant, R., 1989. Physical processes in fragipan formation. In: *Fragipans: Their Occurrence, Classification, and Genesis* (Eds. Smeck, N. & Ciokolsz, E.), 141-150. Soil Science Society of America, Special Publication No. 24, Madison, Wisconsin, 153 pp.
- Burn, C., 2007a. Thermokarst topography. *Encyclopedia of Quaternary Science* (ed. Elias, S.), 2153-2170. Elsevier Science Publishers B.V.
- Burn, C., 2007b. Permafrost. *Encyclopedia of Quaternary Science* (ed. Elias, S.), 2191-2199. Elsevier Science Publishers B.V.
- Cailleux, A. & Tricart, J., 1950. Un type de solifluction: le coulées boueuses. *Revue de Géomorphologie dynamique*, 1, 4-46.
- Calmels, E., Allard, M. & Delisle, G., 2008. Development and decay of a lithalsa in Northern Québec: a geomorphological history. *Geomorphology*, 97, 287-299.
- Campy, M. & Macaire, J.-J., 2003. *Géologie de la surface. Erosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux*. Dunod, Paris, 440 pp.

- Christiansen, H., 1996. Effects of nivation on periglacial landscape evolution in Western Jutland, Denmark. *Permafrost and periglacial Processes*, 7, 111-138.
- Crombé, Ph., Langohr, R. & Velghe, M., 1991. Un site Mésolithique récent à Oeudeghien (Hainaut Occidental). *Notae Praehistoricae*, 11, 37-40.
- Deconynck, J. & Laloo, P., 2018. Fluxys-gasleiding Alveringem-Maldegem. Archeologisch onderzoek. Lot 5: deelzone Hoogdele – Maldegem. Studie in opdracht van Fluxys, uitgevoerd door Monument Vandekerckhove, nv Ruben Willaert bvba, Gate bvba, Gent, 481 pp.
- De Moor, G. & Heyse, I., 1978. De morfologische evolutie van de Vlaamse Vallei. *De aardrijkskunde*, 1978, 4, 343-375.
- De Moor, G., 1983. Cryogenic structures in the Weichselian of northern Belgium and their significance. *Polarforschung*, 53, 2, 79-86.
- French, H., 2007. *The Periglacial Environment*. Wiley, 458 pp.
- Frenzel, B., Pécsi, A. & Velichko, A., 1992. *Atlas of paleoclimates and paleoenvironments of the northern Hemisphere, Late Pleistocene – Holocene*. International Union for Quaternary Research, Hungarian Academy of Sciences, 153 pp.
- Ghysels, G., 2001. Studie van polygonale fossiele structuren in Vlaanderen, op basis van luchtfoto's en veldonderzoek. *De Aardrijkskunde*, 2001, 1-2, 21-36.
- Gullentops, F. & Paulissen, E., 1978. The drop soil of the Eidsen type. *Biul. Peryglacjalny*, 27, 105-114.
- Haesaerts, P. & Van Vliet, B., 1973. Evolution d'un permafrost fossile dans les limons du Dernier Glaciaire à Harmignies (Belgique). *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 1973, 3, 151-164.
- Harris, S., French, H., Heginbottom, J., Johnston, G., Ladanyi, B. & van Everdingen, R., 1988. La terminologie du pergélisol et notions connexes. Conseil National de Recherches Canada, Note de service technique no. 142, 154 pp.
- Heyse, I., 1983. Fossil cryoturbation types in eolian Wurm Late Glacial sediments. *Polarforschung*, 53, 2, 87-95.
- Heyse, I. & Ghysels, G., 2003. Fossil polygonal periglacial structures in Flanders (Belgium). In: *Permafrost*, Vols 1 and 2 (eds. Phillips, M. Springman, S. & Arenson, L.), 395-400. Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland, 21-25 July 2003. A.A. Balkema, 1322 pp.
- Hilton, M., 2003. Quantifying postdepositional redistribution of the archaeological record produced by freeze-thaw and other mechanisms: an experimental approach. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 10, 165-202.
- Isarin, R., 1997. Permafrost distribution and temperatures in Europe during the Younger Dryas. *Permafrost and Periglacial Processes*, 8, 313-333.
- IUSS Working Group WRB, 2022. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 236 pp.
- Jones, A., Stolbovoy, V., Tarnocai, C., Broll, G., Spaargaren, O. & Montanarella, L. (eds.), 2010. *Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region*. European Commission. Publications office of the European Union, Luxembourg, 144 pp.
- Koster, E. & van der Meer, J., 2013. Sporen van gletsjers, landijs en permafrost. *Grondboor & Hamer*, 2013, 4/5, 150-161.
- Langohr, R., 2008. Bosreservaat Pruikenmakers (Meerdaalwoud). Rapport Bodemprospectie. ASDIS, Brussel, 104 pp.
- Langohr, R., 2016. La Forêt de Soignes – Site unique pour les sciences de la terre et l'archéologie. Comprendre l'évolution du paysage pédologique dans la région des loess en Belgique. Le facteur édaphique dans l'écologie forestière. Un aperçu de 45 ans de recherche. Excursion 08 Juillet 2016, Association Française des Sols – Soil Science Society of Belgium, 29 pp.
- Langohr, R. & Van Vliet, B., 1979. Clay migration in well to moderately well drained Acid Brown soils of the Belgian Ardennes. Morphology and clay content determination. *Pédologie*, 19, 367-385.
- Langohr R. & Vermeire R., 1982. Well drained soils with "degraded" Bt horizons in loess deposits of Belgium relationship with paleoperiglacial processes. *Biuletyn Peryglacjalny*, 29, 203-212.
- Langohr, R. & Sanders, J., 1984. Apport de la pédologie à la reconstitution du paléoenvironnement en Belgique. In: *Peuples chasseurs de la Belgique Préhistorique dans leur cadre naturel* (eds. Cahen, D. & Haesaerts, P.), 41-52. Inst. royal Sci. Naturelles Belgique.
- Langohr, R. & Marcelino, V., 2012. Origin of the calcium carbonate of the bog marl deposit of the Moervaart Depression in the cover sand area of NW Belgium. Micromorphological evidences of decarbonation and clay migration under a permanent groundwater table in sand ridges. Poster presentation, 14th Int. Meeting on Soil Micromorphology, 8-14 July 2012, Lleida, Spain.
- Langohr, R., Marcelino, V., Yans, J., Bock, L. & Engels, P., 2012. Micromorphological characterization clay migration features. Relation to soil structure in a 3 m deep plateau soil at Transinne, Belgian Ardennes. 14th Int. Working Meeting on Soil Micromorphology, Lleida, 2 July 2012 2 Session IV. Micromorphology for paleopedology, sediments and loess-paleosoil sequences, 28 pp.

- Langohr, R., Nicosia, C. & Devos, Y., 2015. Reading the soilscape and the anthropic impact in its evolution. In: *Detecting and understanding historic landscapes* (eds. Chavarria Arnau, A. & Reynolds, A.), 267-292. PCA Studies 2, SAP Società Archeologica, Mantova.
- Leunissen, J. & Yi, H., 2009. Self-pressurized rapid freezing (SPRF): a novel cryofixation method for specimen preparation in electron microscopy. *Journal of Microscopy*, 235, 25-35.
- Louwagie, G. & Langohr, R. 2005. Pedo-lithostratigraphical analysis. In: *The Last Hunter-Gatherer-Fishermen in Sandy Flanders (NW-Belgium). The Verrebroek and Doel Excavation Projects. Volume 1: Palaeo-environment, chronology and features* (Ed. Crombé, Ph.), 27-107. Archaeological Reports Ghent University 3, 334 pp.
- Mackay, R., 1974. Reticular ice veins in permafrost, Northern Canada. *Canadian geotechnical Journal*, 11, 230-237.
- Maréchal, R., 1956. L'étude des phénomènes périglaciaires en Belgique. *Biuletyn Peryglacjalny*, 4, 83-98.
- Maréchal, R. & Maarleveld, G., 1955. L'extension des phénomènes périglaciaires en Belgique et aux Pays-Bas. *Mededelingen van de Geologische Stichting, Nieuwe Serie*, 8, 77-86.
- Murton, J., 2007. Ice wedges and ice wedge casts. *Encyclopedia of Quaternary Science* (ed. Elias, S.). Elsevier Science Publishers B.V., 2153-2170.
- Nelson, F., Anisimov, O. & Shiklomanov, N., 2001. Subsidence risk from thawing permafrost. *Nature*, 410, 6831, 889-890.
- Paepe, R. & Vanhoorne, R., 1967. The stratigraphy and palaeobotany of the late Pleistocene in Belgium. Memoir Nr. 8, *Geological survey of Belgium*, 109 pp.
- Payton, R., 1992. Fragipan formation in argillic Brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain. North-East England; I, Evidence for a periglacial stage of development. *European Journal of Soil Science*, 43, 4, 621-644.
- Payton, R., 1993a. Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. II. Post Devensian developmental processes and the origin of fragipan consistence. *European journal of Soil Science*, 44, 4, 703-723.
- Payton, R., 1993b. Fragipan formation in argillic brown earths (Fragiudalfs) of the Milfield Plain, north-east England. III. Micromorphological, SEM and EDXRA studies of fragipan degradation and the development of glossic features. *European journal of Soil Science*, 44, 4, 725-739.
- Pissart, A., 1964. Avancement des recherches périglaciaires en Belgique de 1956 à 1963. *Biuletyn Peryglacjalny* 14, 67-75.
- Pissart, A., 1976. Les dépôts et la morphologie périglaciaires de la Belgique. In: *Géomorphologie de la Belgique, Hommage au Professeur Paul Macar* (eds. Macar, P. & Pissart, A.), 115-135. Laboratoire de géologie et géographie physique, Université de Liège, 224 pp.
- Pissart, A., 1987. *Geomorphologie périglaciaire*. Belgische Franqui Leerstoel 1987, Rijksuniversiteit Gent, Faculteit Wetenschappen, 135 pp.
- Pissart, A., 1995. L'Ardenne sous le joug du froid. Le modèle périglaciaire du Massif Ardennais. In: *L'Ardenne : essai de géographie physique: hommage au Professeur Albert Pissart* (ed. Demoulin, A.), 136-154. Département de Géographie physique et Quaternaire, Université de Liège, 238 pp.
- Pissart, A., 2000. Remnants of lithalsas of the Hautes Fagnes, Belgium. A summary of present-day knowledge. *Permafrost and Periglacial Processes*, 11, 4, 327-355.
- Pissart, A., 2007. La formation des lithalses et leur croissance latérale. *Académie royale de Belgique, Bulletin de la Classe des Sciences*. 6e série, Tome XVIII, 7-12, 273-294.
- Pissart, A., 2013. Palsas and lithalsas. *Treatise on geomorphology*, 8, 223-237.
- Pissart, A. & Juvigné, E., 1980. Genèse et âge d'une trace de butte périglaciaire (pingo ou palse) de la Konnerzvenn (Hautes Fagnes, Belgique). *Annales de la Société géologique Belge*, 103, 73-86.
- Sanders, J., Langohr, R. & Cuyckens, G., 1985. Bodems en reliëf in het Zoniënbos. Inleiding tot een excursie. *De Aardrijkskunde*, 1985, 2, 87-133.
- Schaetzel, R. & Thompson, M., 2015. *Soils, Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, 778 pp.
- Seppala, M, 2006. Palsa mires in Finland. *The Finnish environment*, 23, 155-162. https://www.researchgate.net/publication/266241369_Palsa_mires_in_Finland
- Sevenants, W., Langohr, R., Mikkelsen, J., Simpson, D., Van Meirvenne, M. & Kempeneers, P., 2009. Een archeologische evaluatie en waardering van de site Butsel te Boutersem (provincie Vlaams-Brabant). Triharch Rapport 2009-3, Vlaamse Overheid, Agentschap R-O Vlaanderen. 192 pp.
- Smalley, I. & Davin, J., 1982. Fragipan horizons in soils: a bibliographic study and review of some of the hard layers in loess and other materials. New Zealand Soil Bureau Bibliographic Report 30, 122 pp.
- Smalley, I., Bentley, S. & Markovic S., 2016. Loess and fragipans: Development of polygonal-crack-network structures in fragipan horizons in loess ground. *Quaternary International*, 399, 228-233.
- Soil Science Society of America, 2008. *Glossary of Soil Science Terms 2008*. Madison, WI, USA.

- Sveistrup T., Haraldsen T., Langohr R., Marcelino V. & Kvaerner J., 2005. Impact of land use and seasonal frost on morphological and physical properties of silty Norwegian soils. *Soil & Tillage Research*, 81, 1, 39-56.
- Svensson, H., 1977. Observations on polygonal fissuring in non-permafrost areas of the northern countries. *Akad. Wissensch. Göttingen, Math. Phys. Kl. III, Folge* 31, 63-76.
- Tavernier, R., 1945. Phénomènes périglaciaires en Belgique. *Bulletin Société belge Et. Géogr.*, 14, 112-133.
- Tricart, J., 1967. *Le modelé des régions périglaciaires*. Traite de Géomorphologie, Tome II, Sedes, Paris, 512 pp.
- Tricart, J. & Cailleux, A., 1961. *Le modelé périglaciaire*. Cours de Géomorphologie, C.D.U., Paris, 350 pp.
- Vandenbergh, J., French, H., Gorbunov, A., Marchenko, S., Velichko, A., Jin, H., Cui, Z., Zhang, T. & Wan, X., 2014. The Last Permafrost Maximum (LPM) map of the Northern Hemisphere: permafrost extent and mean annual air temperatures, 25–17 ka BP. *Boreas*, 43, 652–666.
- Van Huissteden, K. & Vandenbergh, J., 2022. *Permafrost nu en in de tijd*. KNNV Uitgeverij, 319 pp.
- Van Ranst, E., Mees, F., Bock, L. & Langohr, R., 2014. Development of a clay-rich interval above a limestone substrate in the Condroz region of southern Belgium. *Catena*, 121, 204-213.
- Van Vliet-Lanoë, B., 1976. Traces de ségrégation de glace en lentilles associées aux sols et phénomènes périglaciaires fossiles. *Biul. Peryglacjalny*, 26, 41-55.
- Van Vliet-Lanoë, B., 2005. *La planète des glaces, histoire et environnements de notre ère glaciaire*. Vuibert, 470 pp.
- Van Vliet, B. & Langohr, R., 1981. Correlation between fragipan and permafrost with special reference to Weichsel silty deposits in Belgium and northern France. *Catena*, 8, 137-154.
- Van Vliet, B. & Langohr, R., 1983. Migration d'argiles et fragipan en Europe de l'Ouest. In: Sols lessivés glossiques et fragipan. Notes et Comptes, rendus du Groupe de travail «Régionalisation du Périglaciaire», Caen, 35.
- Van Vliet-Lanoë, B. & Lisitsyna, O., 2001. Permafrost extent at the Last Glacial Maximum and at the Holocene optimum. In: *Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources* (eds. Paepe, R. & Melnikov, V.), 215-225. NATO Science Series, Kluwer.
- Washburn, A., 1979. *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. Edward Arnold, 406 pp.

Geraadpleegde website op 10/09/2025

<https://www.coolgeography.co.uk/A-level/AQA/Year%2012/Cold%20environs/Periglaciation/Periglacial%20land-forms.htm>

IN DIALOOG MET BODEMS VELDBODEMKUNDE VOOR ARCHEOLOGISCH ONDERZOEK

BODEMBIOTURBATIE DOOR DIEREN



AUTEURS : ROGER LANGOHR
CAROLE AMPE
JARI HINSCH MIKKELSEN

1. Inleiding

In een natuurlijk ecosysteem, zoals een bos, wordt de bodem vaak als onbeweeglijk of statisch beschouwd, dit in tegenstelling tot fauna en zelfs flora die evolueren door de tijd heen. Toch kunnen in een schijnbaar stabiel bodemlandschap door verschillende turbatieprocessen, artefacten in de bodem verspreid worden. Turbatieprocessen kunnen een of meerdere horizonten volledig transformeren en tegelijkertijd binnen het profiel een nieuwe horizont creëren (e.g. Hoeksema, 1953; Hoeksema & Edelman, 1960). Deze processen kunnen, net zoals erosie- en sedimentatieprocessen (zie thema ‘Erosie en sedimentatie’), een sterke impact hebben op het ecosysteem, op de leesbaarheid van de archeologische structuren en de verspreiding van artefacten (Bertran *et al.*, 2019). In deze publicatie ‘Veldbodembkunde voor archeologisch onderzoek’ ligt de focus op bioturbatie door dieren en planten en op kryoturbatie, de belangrijkste processen van bodemverstoring in België. Bodemverstoring door planten wordt besproken onder het thema ‘Bodembioturbatie door planten’, kryoturbatie onder het thema ‘Periglaciale processen en kryoturbatie’.

Sommige turbatieprocessen homogeniseren de bodem, andere verhogen sterk de variabiliteit in de bodem. Vaak ontbreekt een uitvoerige bespreking van deze processen in de handboeken voor bodemkunde. Schaetzel & Thompson (2015) is hierop een uitzondering. Gelukkig behandelen nu heel wat archeologen en bodemkundigen dit onderwerp (e.g. Johnson & Watson-Stegner, 1990; Dunwell & Trout, 1999; Balek, 2002; Johnson, 2002). Johnson & Watson-Stegner (1990) noemen een tiental processen van pedoturbatie: aero-, aqua-, argillo-, kryo-, crystal-, fauna-, flora-, gravi-, impact- en seismiturbatie. Onderzoek naar de impact van faunaturbatie op bodems is beschreven in Vermeersch & Bubel (1997) en Bubel (2003). Crombé (1993, 1996) komt tot het besluit dat de spreiding van artefacten op talrijke laatpaleolithische en vroeg- en middenmesolithische sites in Vlaanderen kan verklaard worden door ontwortelde bomen, de zogenoemde windworpen, die de bodem hebben verstoord nadat de sites zijn verlaten.

Een aantal verstoringen heeft een lokale oorzaak zoals bijvoorbeeld ontwortelde bomen, boomstronken, gravende dassen, konijnen en mollen. Meestal zijn er dan duidelijke sporen van deze activiteiten in de bodem terug te vinden. Nochtans zijn er bodemprocessen die veel minder spectaculair zijn en die toch een zeer grote rol spelen in het geleidelijk zakken van artefacten in de bodem. Dit kan men beschrijven als de **'diffuse' bioturbatie**. Deze soort bioturbatie is het resultaat van een langdurig proces van groei en afsterven van wortels en van graafactiviteiten van kleinere dieren zoals wormen, larven en insecten zoals mieren. Na lange perioden (meer dan enkele eeuwen) zijn de sporen van deze gangen niet meer zichtbaar. Vandaag zien wij slechts de laatste generatie(s) van gangen in een homogene bodemmatrix die diffuse bioturbatie heeft ondergaan (figuren D1-D5).

Schwartz & Gebhardt (2011) wijzen erop dat in de literatuur over archeologische sites in onze streken, de verspreiding van artefacten in de diepere bodemlagen dikwijls wordt toegeschreven aan nieuwe colluviale of eolische afzettingen die de oudere loopvlakken begraven. Het proces van diffuse bioturbatie waarbij artefacten vanaf het bodemoppervlak naar dieper gelegen lagen zakken, wordt daarentegen veel minder vaak genoemd. Een goed voorbeeld van het effect van diffuse bioturbatie op de verspreiding van artefacten in de bodem, is het onderzoek van Bats *et al.* (2004) op een site in Haelen (Nederland). In dit onderzoek werden de middeleeuwse scherven gevonden op een diepte van 10 tot 20 cm, het aardewerk uit de middenbronstijd en de ijzertijd tot 30 cm diep, de vroegneolithische scherven vooral tussen 40 en 50 cm en de vroegmesolitische vondsten tussen 40 en 60/70 cm diepte.



Fig. D1-D3: Op de foto is een bodem van een akker of moestuin te zien die gedurende 5 eeuwen bewerkt en bemest is geweest met huisafval, inclusief mortel en baksteenfragmenten. Oorspronkelijk was deze leembodem niet kalkrijk maar vandaag is de bodemmatrix lichtjes kalkrijk tot ongeveer 1 m diepte. Dit voorbeeld toont aan dat **mettertijd de volledige bodem tot 1 m diepte volledig gebioturbeerd is**. Talrijke gangen van grote regenwormen zijn gevuld met deze fragmentjes tot 3 mm diameter. Deze steentjes werden achtergelaten door regenwormen die ze opeten om hun spijsvertering te bevorderen (Bouché, 2014: 61). De gangen die we vandaag waarnemen, zijn van de huidige generatie regenwormen. (Site Keizersberg, Leuven, provincie Vlaams-Brabant, België) (Sevenants *et al.*, 2010: 138-145).



Fig. D4: Bodemprofiel van een chernozem op de site van het Louvre-Jardins du Carrousel, Parijs, Frankrijk. Het klimaat kent een jaarlijkse neerslag die ongeveer gelijk is aan de verdamping, vandaar dat de bodem vandaag vanaf het bodemoppervlak nog kalkrijk is. De regenwormgangen gaan tot 170 cm diep, de bodem is op dat niveau tijdens de zomer nog steeds vochtig. Tussen 170 en 200 cm zijn er veel mollengangen te zien. De mollen graven vanaf de bovenste bodemhorizonten tot deze diepte om daar te foerageren op de estiverende regenwormen. (Pieters, 1991, 1993, 1994, 1998).

H1+H2: 0-95 cm: A β 1+A β 2; oppervlaktehorizonten, donkergekleurd, rijk aan organisch materiaal en intens gebioturbeerd door regenwormen (chernozem bodem). Talrijke artefacten zijn aanwezig in de bovenste 40 cm (H1).

H3: 95-170 cm: B β 1; biologisch actieve horizont met talrijke regenwormgangen. De bodemmatrix tussen de regenwormgangen vertoont geen gelaagdheid.

H4: 170-200 cm: B β 2; donkere onregelmatige begrensde horizont, sterk gebioturbeerd door mollen met talrijke horizontale gangen.

H5: 200+ cm: C; moedermateriaal bestaande uit lemige, kalkrijke, laatglaciale, gestratificeerde, alluviale afzettingen.



Fig. D5: Een grote steen afgezet in alluviale sedimenten. Vermoedelijk werd de steen vervoerd op een groot stuk ijs van een bevroren rivier. Toen het ijs op het einde van de winter smolt (het 'débacle'), zonk de steen. De bodem onder de steen toont nog steeds de originele gelaagdheid van het sediment, omdat de bodem hier niet verstoord werd door regenwormen. (© J.-P. Charniot, Etablissement Public du Grand Louvre).

Interpretatie: De wormgangen die we nu zien, behoren tot de recente wormactiviteit, maar ook de aarde tussen de zichtbare gangen is gebioturbeerd. De oudere wormgangen zien we niet meer omdat de organische stof verbruikt is door de microbiële activiteit.

Voor het archeologisch onderzoek zijn er 3 types van verstoringen belangrijk: de verplaatsing van artefacten, de vernietiging van archeologische structuren en de vorming van pseudo-archeologische structuren.

1. Verplaatsing van artefacten: het is van essentieel belang om te controleren of de artefacten, gevonden tijdens opgravingen, zich al dan niet in hun oorspronkelijke positie bevinden. Indien de artefacten verplaatst zijn, moet men proberen hun bewegingen zo goed mogelijk te reconstrueren om een beeld te krijgen van hun oorspronkelijke positie, dit wil zeggen hun verspreiding op het moment van de bewoning of ten minste het ogenblik waarop de site werd verlaten. Afhankelijk van het type proces, kunnen de artefacten niet alleen in het profiel afzakken, maar ze kunnen ook schuin migreren of zelfs verticaal naar boven bewegen.
2. Vernietiging van archeologische sporen: de bioturbatie kan zo belangrijk zijn dat ze de archeologische structuren zoals loopvlakken, paalgaten en interne structuren van *tumuli* en aardwallen gedeeltelijk of zelfs volledig vernietigt (Dunwell & Trout, 1999).
3. Vormen van pseudo-archeologische structuren: bepaalde processen kunnen bodemstructuren creëren die sterk gelijken op sporen van menselijke activiteiten, zoals paalgaten, grachten en haardkuilen. Bij de identificatie van deze natuurlijke structuren kan de archeobodemkunde een belangrijke ondersteuning bieden bij het archeologisch onderzoek. Ontwortelde bomen, vallende boomtakken, kryoturbaties en bepaalde nesten van dieren zoals mieren zijn voorbeelden van zo'n verstoringen die foutief als menselijke sporen kunnen geïnterpreteerd worden.

De volgende paragrafen geven een overzicht van de belangrijkste natuurlijke bodemprocessen door dieren die archeologische sporen verstoren. In afzonderlijke thema's bespreken we de verstorende bodemprocessen door planten, menselijke activiteiten en vries/dooiprocessen.

2. Bodembioturbatie door dieren

Eerst worden de verstoringen van dieren op het bodemoppervlak behandeld, daarna volgt de impact van gravende dieren in de bodem.

2.1. Fauna die het bodemoppervlak verstoort

Verplaatsing en stand(rust)plaats

De passage en het stallen van dieren, wild of gekweekt, in bossen (figuren D6-D8), weiden (figuren D9-D11), bij drinkplaatsen (figuren D26-D29, D33-D48), in kralen (figuren D12, D13) en rustplaatsen (figuren D14-D17, D59), kunnen de bodem aanzienlijk verstoren. Vier aspecten zijn hier belangrijk:

1. vernietiging van de vegetatie (figuren D6-D17),
2. concentratie van uitwerpselen en urine (figuren D12-D17),
3. samendrukken van de bodem (figuur D21),
4. verstoring van het bodemoppervlak door instulpingen (figuren D22-D48, D56, D57).

De impact op de bodem van 'vertrappelen' (En.: *trampling*; Fr.: *piétinement*) en 'ploeteren' (En.: *puddling*, *poaching*; Fr.: *patauger*) is verschillend (Rentzel *et al.*, 2017) (figuren D18-D21). Bij vertrappelen wordt de bodem gecompacteerd, bij ploeteren vormen er zich instulpingen in de bodem.

Vertrappelen van de bodem (figuren D6-D17)



Fig. D6-D8: Bij de doortocht van vee in bos, kan er een pad ontstaan. Dit kan erosie veroorzaken, zelfs onder de bomen (zie bijvoorbeeld Julia & Voiculescu, 2022). Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.



Fig. D9-D11: Waar vee zich verplaatst in een weide, kan er een pad ontstaan. Hierdoor kan erosie optreden. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.



Fig. D12-D13: Dierenperken ondergaan sterke vertrappeling. Artefacten zoals keramiek riskeren hier verder verbrokken te worden. Links kippenren (provincie Vlaams-Brabant, België). Rechts: varkensuitloop (Corsica, Frankrijk).



Fig. D14: Rustplaats van paarden. Vertrappelde bodem aangerijkt met mest en urine. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.



Fig. D15-D16: Rustplaats van runderen met intensieve betreding; fig. D16: dezelfde locatie zonder dieren, vegetatieloos met een bodem aangerijkt met mest en urine. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje



Fig. D17: Rustplaats van runderen en schapen. Door de vernietiging van de vegetatie, worden de bodems erosiegevoeliger en kan de wind het sediment doen opwaaien. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.

Vertrappelen en ploeteren op een archeologische site – de motte van Werken, provincie West-Vlaanderen, België (figuren D18-D21)

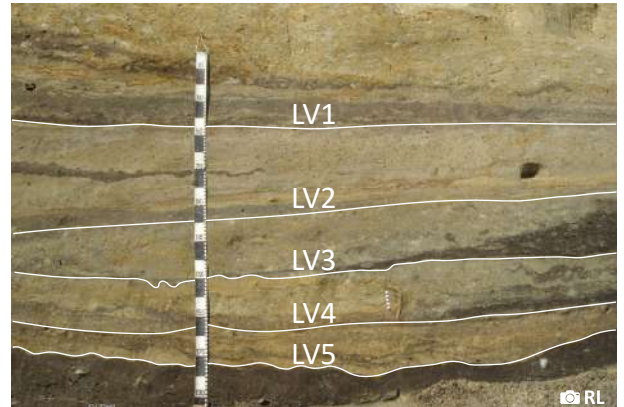


Fig. D18-D19: Motte van Werken. Een antropogene heuvel met minstens 5 opeenvolgende loopvlakken. Links: algemeen zicht. Rechts: detail van 5 loopvlakken (LV1 tot LV5), alle met kenmerken van **vertrappelen** (Gebhardt & Langohr, 1999).

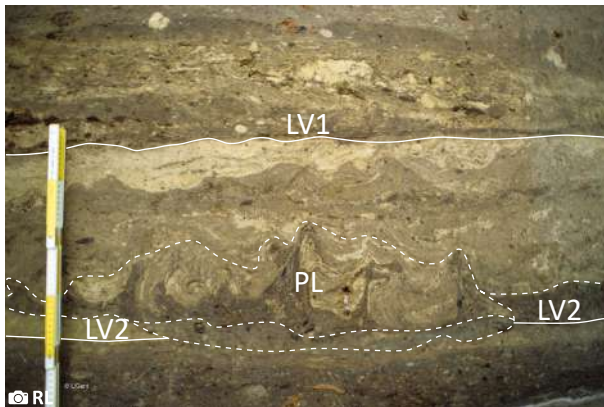


Fig. D20: Twee loopvlakken met sporen van **vertrappeling** (LV1-LV2).

Het onderste loopvlak (LV2) was bedekt met losse aangevoerde aarde. Kort daarna, op een ogenblik dat de bodem vochtig was, liep er vee (koeien) over dit oppervlak. De dieren zakten in de losse aarde en veroorzaakten met hun hoeven diepe instulpingen kenmerkend voor **ploeteren** (PL). De morfologie van een gespleten hoef op een horizontaal vlak is te zien in fig. D23. Hier zal het aardewerk weinig gefragmenteerd worden. Het ploeteren stopt aan de onderzijde van het loopvlak (LV2) dat verdicht is door het vertrappelen. Verwar deze morfologie niet met kryoturbatie! (zie fig. D49-D52).

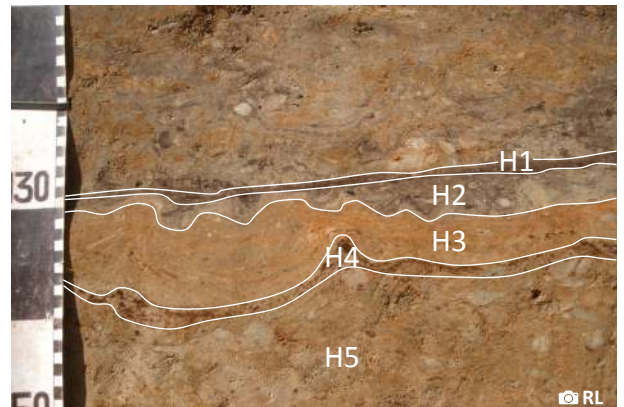


Fig. D21: Een loopvlak (H1) sterk vertrappeld door kleinvee. De bodem is sterk verdicht tot 10 cm diepte (H2 + H3). H2: kleine grijze humusrijke instulpingen van poten van kleinvee. IJzer en mangaan zijn hier opgelost en gemigreerd. IJzer slaat eerst neer (H3), vervolgens mangaan (H4) op de grens met de niet-verdichte bodem (H5). Deze sequentie toont aan dat de bovenkant van de verdichte zone waterverzadigd was en zuurstof aan de onderzijde ervan voorkwam. Mangaan heeft meer zuurstof nodig dan ijzer om neer te slaan en migreert dus dieper dan ijzer. Als aardewerk in de H1-H3 aanwezig zou zijn, zou dit door vertrappeling sterk gefragmenteerd worden.

Bij **vertrappelen** wordt de bodem sterk samenge-drukt, zonder instulpingen. Hierdoor kan de bo-venste gecompacteerdde horizont zich in anaerobe toestand bevinden (afwezigheid van zuurstof). In deze zuurstofarme zones van de bodem kunnen ijzer en mangaan reduceren (Fe^{3+} wordt Fe^{2+} ; Mn^{4+} wordt Mn^{2+}) waardoor ze oplosbaar worden en mi-greren tot een diepere, niet verdichte horizont die opnieuw meer zuurstof bevat (figuur D21). Wan-neer de bodem aangerijkt is met mest en urine, kan het oplosbaar ijzer zich binden aan fosfor, een niet oplosbaar element aanwezig in het excrement. Het gevormde oplosbare ijzerfosfaat, met een bruingele tot olijfgroene kleur, verplaatst zich in een anaeroob milieu. Wanneer het ijzerfosfaat neerslaat in een anaeroob milieu vormt er zich vivianiet dat een wit-te kleur heeft, wanneer het vivianiet terug oxideert, krijgt het een helblauwe kleur (zie thema 'Bodem-kleur'). Voorbeelden van vertrappelen zijn bijvoor-beeld te zien bij huisvloeren en dierenverblijven op een droge bodem.

Door het vertrappelen, vernietigen de dieren de strooisellaag en de kruidenvegetatie die de bodem beschermen tegen erosie. De bodemverdichting beperkt de waterinfiltratie sterk met op de hellin-gen een risico op wind- (figuur D17) en watererosie. Zelfs in bosbestanden of op weiden, waar normaal geen erosie is, kunnen paden ontstaan met kans op geulerosie (figuren D6-D11). De verstoring van ar-cheologische sporen blijft hier beperkt tot het bre-ken van de artefacten en tot kleine laterale verplaat-singen ervan (zie ook Driscoll *et al.*, 2016).

Waar vee passeert of verblijft, is er een toevoer van excrementen en urine met een verhoging van che-mische elementen zoals stikstof en fosfor die een impact hebben op de vegetatie. Stikstof en fosfor zijn belangrijke nutriënten die de microbiologische activiteit activeren, wat bepaalde bodemdieren zo-als regenwormen aantrekt. En zoals altijd zal dit op zijn beurt de predatoren van wormen, zoals mollen, naar deze plaatsen lokken. Bovendien zal de con-centratie van uitwerpselen mestkevers aantrekken (figuren D186-D188). Deze plaatsen zijn daarom zowel chemisch als fysisch gemerkt, wat soms tot enkele duizenden jaren later kan opgespoord wor-den dankzij bodemmorfologie, indicatorplanten of chemische analyse (fosfor loogt niet uit en stiksto-fisotopen zijn verschillend). Zo is het mogelijk om bijvoorbeeld in een bosbestand een Romeinse kraal of stal op te sporen (Dupouey *et al.*, 2007; Geor-ges-Leroy *et al.*, 2014).

Bij **ploeteren** ontstaan instulpingen wanneer in be-paalde omstandigheden de poten diep in de grond zakken (figuren D22-D25). Voor zandbodems vindt dit proces vooral plaats als de bodem droog is (fi-guur D32). In lemige en kleiige bodems gebeurt dit wanneer de bodem sterk waterverzadigd is (figuren D26-D31, D40-D48). Deze verstoring kan spectaculair zijn, met diepe instulpingen die soms gelijken op periglaciaire kryoturbaties (figuren D20, D36, D37, D42 versus D49-D52).

Actuele vorm van ploeteren: individuele instulpingen (figuren D22-D25)



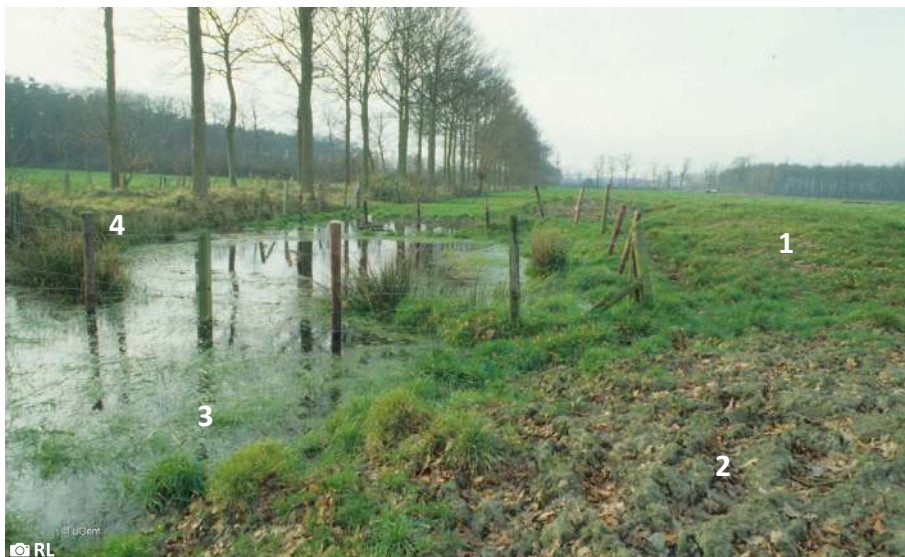
Fig. D22-D25: Niet opgevulde instulpin-gen. Het effect van ploeteren is het dui-delijkst te zien wanneer dieren slechts één keer gepasseerd zijn. Wanneer er nadien een nieuw sediment met een sterk verschillende kleur en/of textuur wordt afgezet, zijn deze sporen een proxy voor ploeteren.

Fig. D22-D23: Pootafdrukken van runde-ren. Montpellier, Frankrijk.



Fig. D24-D25: Niet opgevulde instulpingen. Pootafdrukken van schapen. Mid-delkerke, provincie West-Vlaanderen, België.

Actuele vorm van ploeteren: complexe instulpingen door talrijke passages op drink- en voederplaatsen (figuren D26-D32)



1: Een microheuvel met aarde afkomstig van het graven van de poel.

2: Helling naar de poel, intensief doorploeterd met als resultaat een bloot oppervlak. De aarde zal van de helling geleidelijk afzakken door oppervlakkige afvloeï en het neerwaarts ploeteren van de dieren. Hierdoor geraakt de poel geleidelijk aan opgevuld met humus, stikstof- en fosfaatrijke sedimenten.

3: De poel wordt opgevuld met sedimenten.

4: De steile wand aan het einde van de poel.

Fig. D26: Een typische uitgegraven drinkpoel die frequent door vee bezocht wordt, met vier reliëfposities. Vanaf dat de dieren de poel niet meer betreden, zal de vegetatie snel terug op de oevers groeien en zal het erosie- sedimentatieproces stoppen. Zomer-gem, provincie Oost-Vlaanderen, België.

290 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



- 1: toegang onmogelijk.
- 2: oevererosie waar de dieren komen.
- 3: zone van intensief ploeteren en sedimentatie boven het waterniveau.
- 4: sedimentatiezone met ploeteren onder het waterniveau.
- 5: sedimentatiezone onder water maar zonder ploeteren.



Fig. D27-D28: Gemakkelijk bereikbare drinkplaatsen langs rivieren, meren en vijvers zijn meestal zeldzaam. Waar de toegang mogelijk is, kan de doorgang intensief gebruikt worden. Averbode, provincie Vlaams-Brabant, België.

Fig. D29: Voederplaats voor vee, intensief doorploeterd. Ottignies-Louvain-la-Neuve, provincie Waals-Brabant, België.



Actuele vorm van ploeteren: zeer intensief ploeteren met sterke bodemverstoring tot gevolg (figuren D30-D32)



Fig. D30: Ongelukkige koe op weg van de stal naar de weide. Dit is ongeveer de maximale diepte van ploeteren. Het bodemprofiel zal sterk gelijken op dat van de drinkpoelen. Corroy-le-Grand, provincie Waals-Brabant, België.



Fig. D31: Toegang voor vee naar een weide. Condroz, België



Fig. D32: Diep uitgesleten paardenpad in droog zand. Vlaams natuurreervaat Zwinduinen en -polders, Knokke, provincie West-Vlaanderen, België.

Goed bewaarde individuele instulpingen door ploeteren op archeologische sites (figuren D33-D39)

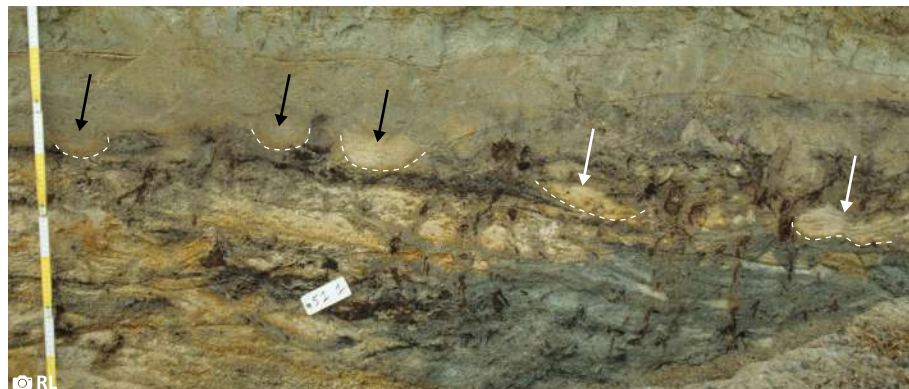
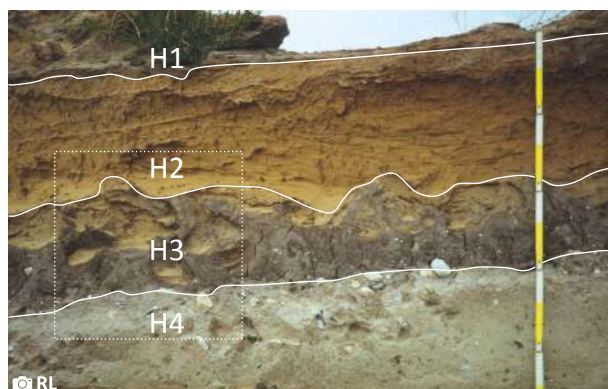
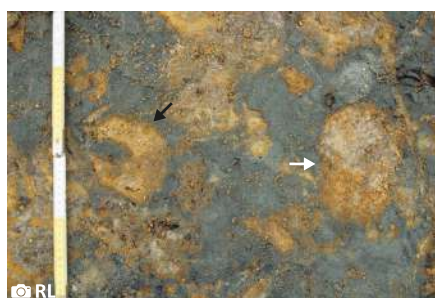
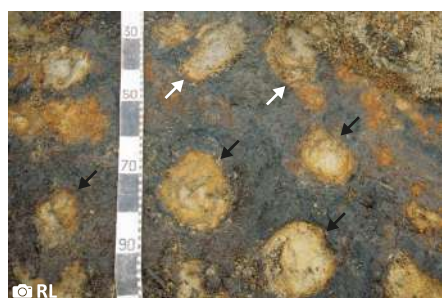


Fig. D33-D35: Ploeteren door runderen (zwarte pijlen) en mens (witte pijlen), later bevestigd aan de hand van een horizontaal vlak (fig. D34-D35) in een bodem-sedimentair complex van een alluviale vlakke. Fig. D33: verticale doorsnede, fig. D34-D35: horizontaal vlak. De instulpingen zijn goed te herkennen dankzij een afdekkend sediment met contrasterende kleur en textuur. La Maxe, alluviale vlakke van de Moezel, Frankrijk.



H1: stabilisatiehorizont met humusaccumulatie.

H2: duinzand dat de site vrij snel bedekte waardoor de boerderij werd opgegeven.

H3: humusrijke sedimenten afgezet in een drinkpoel vlak bij de boerderij, sporen van ploeteren.

H4: zeer compacte grondmorene.

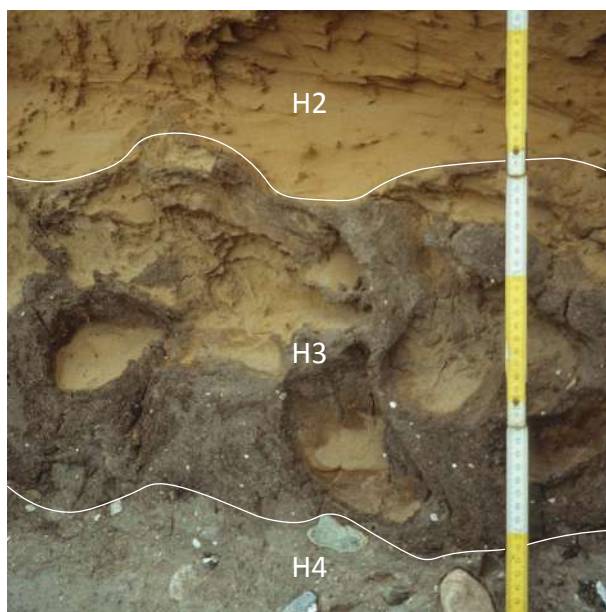
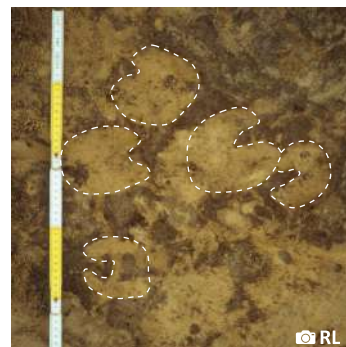
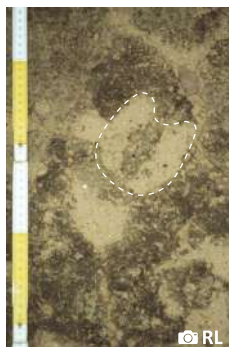


Fig. D36-D39: Ploeteren, door runderen (fig. D38) en mogelijk ook door paarden en kleinvee (fig. D39).

(Mikkelsen *et al.*, 2006, 2007). Bronstijd site te Glesborg, Denemarken.



Eenvoudige vormen van ploeteren op een archeologische site – Wallertheim, Duitsland (figuren D40-D44)

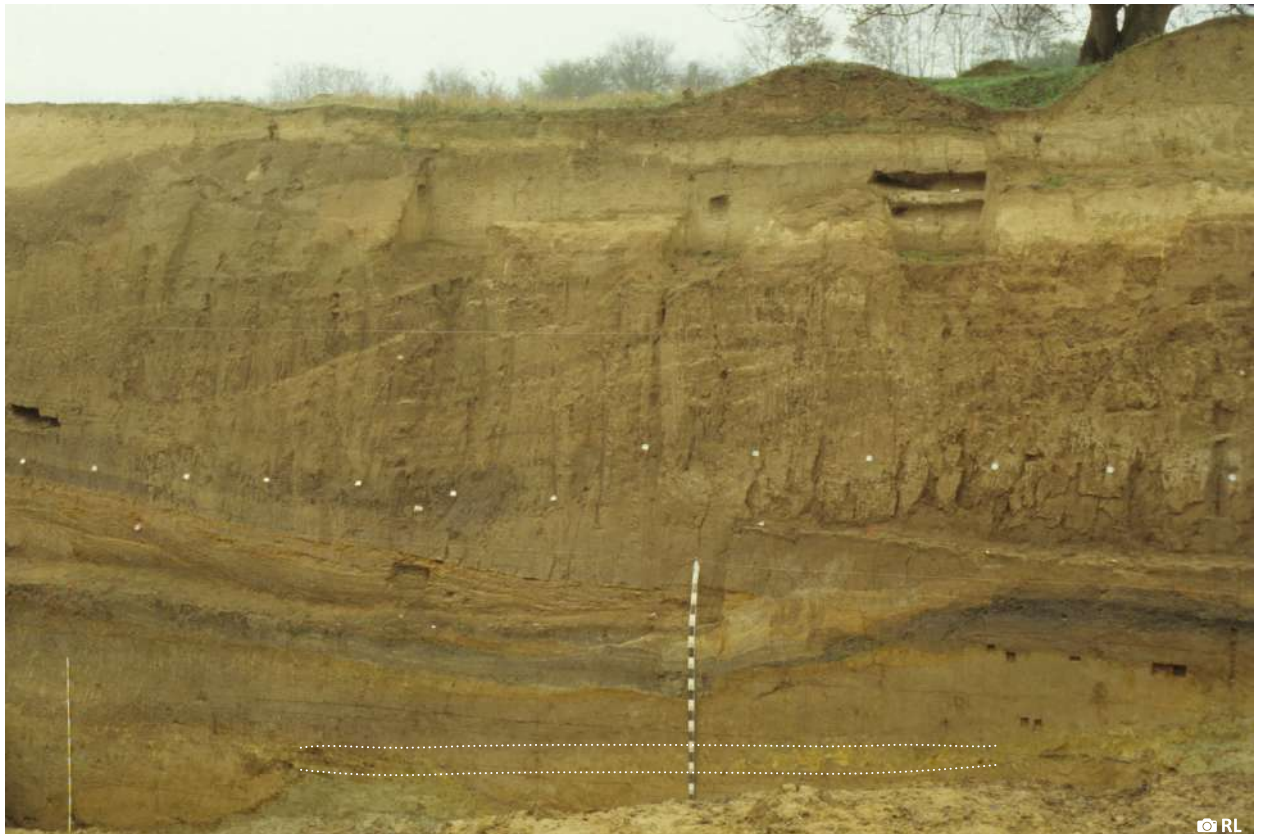
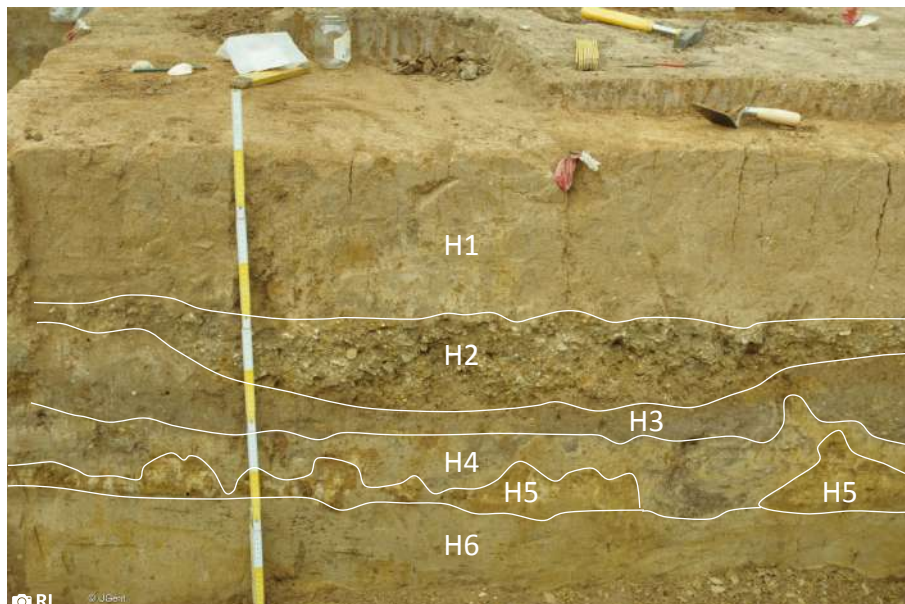


Fig. D40: Neanderthalsite op de grens van de alluviale vlakte en de voethelling. Sporen van een verstoorde bodem tussen de stippellijnen. (Conard *et al.*, 1995, 1996; Haesaerts *et al.*, 1997).



H1: lemig alluvium.

H2: alluviale grindlaag.

H3, H4 en H5: een verstoord bodemprofiel met instulpingen: een humusrijke oppervlaktehorizont (H3), een kleur B-horizont (H4) en een nodulaire fosfaat-aanrijkhedenhorizont (H5).

H6: lemig alluvium.

Fig. D41: De instulpingen van de bodem werden eerst geïnterpreteerd als kryoturbaties, een proxy voor klimaatwijziging, maar omdat **de sortering van de stenen en de capping op de stenen ontbrak**, kon deze interpretatie niet weerhouden worden.



Fig. D42: Detail van een instulping gevuld met humusrijk materiaal afkomstig van de oppervlaktehorizont (A) en humusarm grijs sediment (B). De instulping bereikt het niveau van de fosfaatnodules (C).

Fig. D43: Horizontaal vlak van de bodem sterk verstoord door het ploeteren van dieren die komen drinken aan de rivieroever. De sporen van de poten zijn aangeduid met streepjeslijnen.

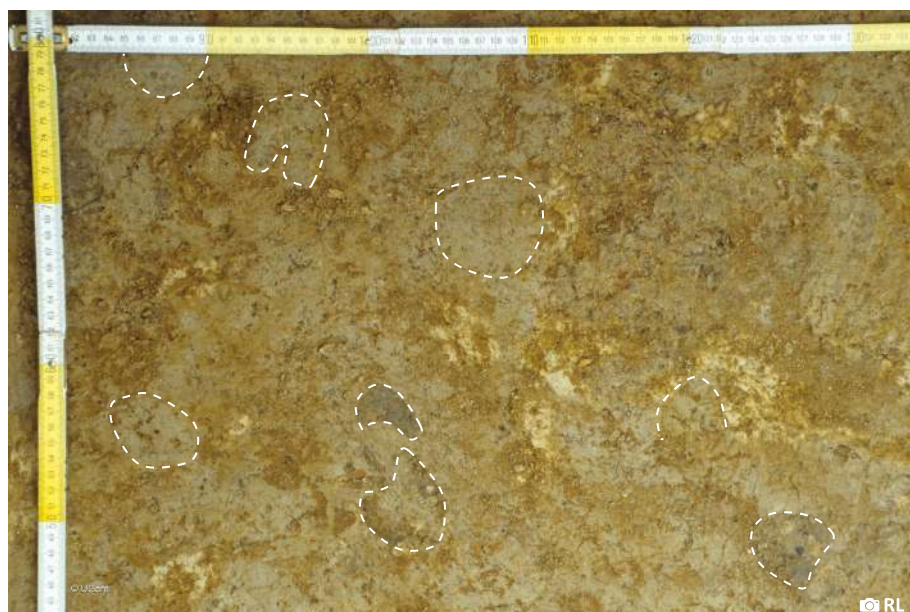
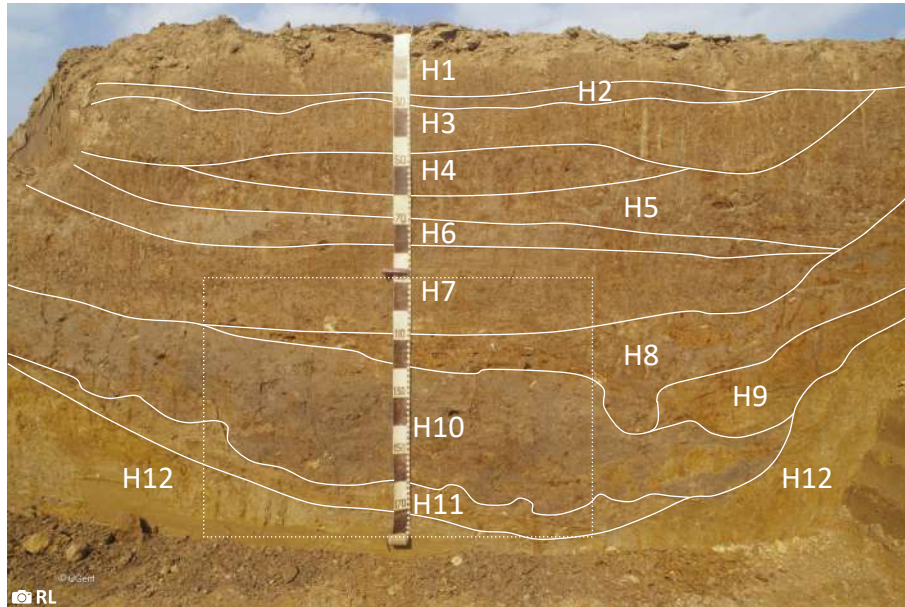


Fig. D44: Horizontaal vlak met detail van een instulping. Het dier duwde de humusrijke oppervlaktehorizont en het artefact dieper in de grond. Het artefact werd gebruikt door neanderthalers om de dieren die kwamen drinken aan de rivieroever, te slachten.

Goed bewaarde complexe instulpingen door talrijke passages op drink- en voederplaatsen (figuren D45-D46)



H1: huidige ploeglaag.

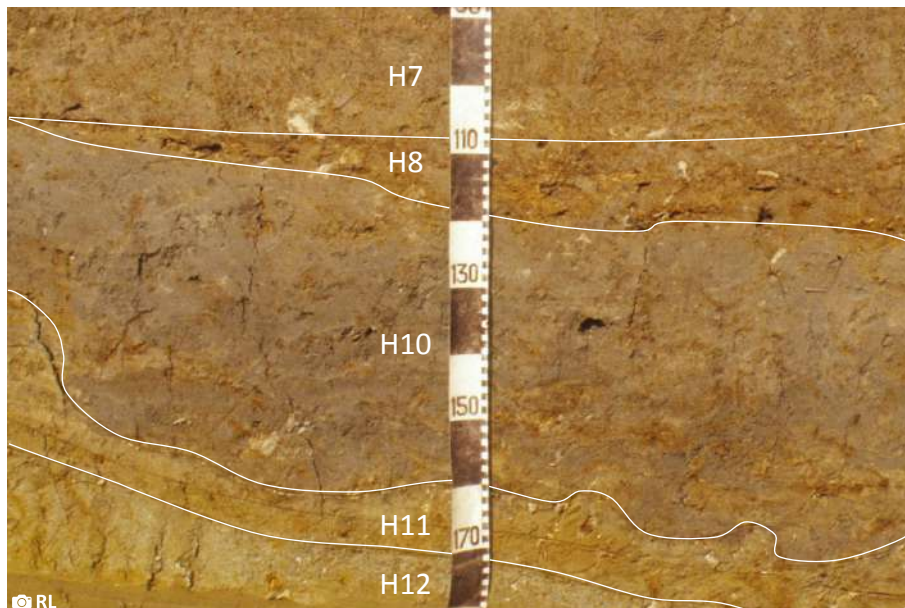
H2-H8: verschillende sedimentlagen die later aangebracht zijn om de poel te vullen. Veel roestvlekken door oxido-reductie.

H9 en rechterdeel H10: ingestort bodemmateriaal aan de steile kant van de poel.

H10: het volledig doorploeterde sediment rijk aan humus en fosfor, dat de poel geleidelijk heeft opgevuld.

H11-H12: de uitgegraven poelbodem.

Fig. D45: Een oude drinkpoel voor vee. De toegang was aan de linkerkant die een zachte helling heeft. Dourges, departement Pas-de-Calais, Frankrijk. (Fechner *et al.*, 2004).



H10: de individuele sporen van ploeteren zijn niet meer observeerbaar door de intensiteit van het proces waardoor een min of meer homogene horizont ontstaat. Minder sporen van ijzer in vergelijking met bovenliggende horizonten.

H11: de bodem van de poel heeft plaatselijk olijkleurige vlekken die wijzen op accumulatie van fosfaat dat met opgelost ijzer uit de doorploeterde horizont (H10) is gemigreerd.

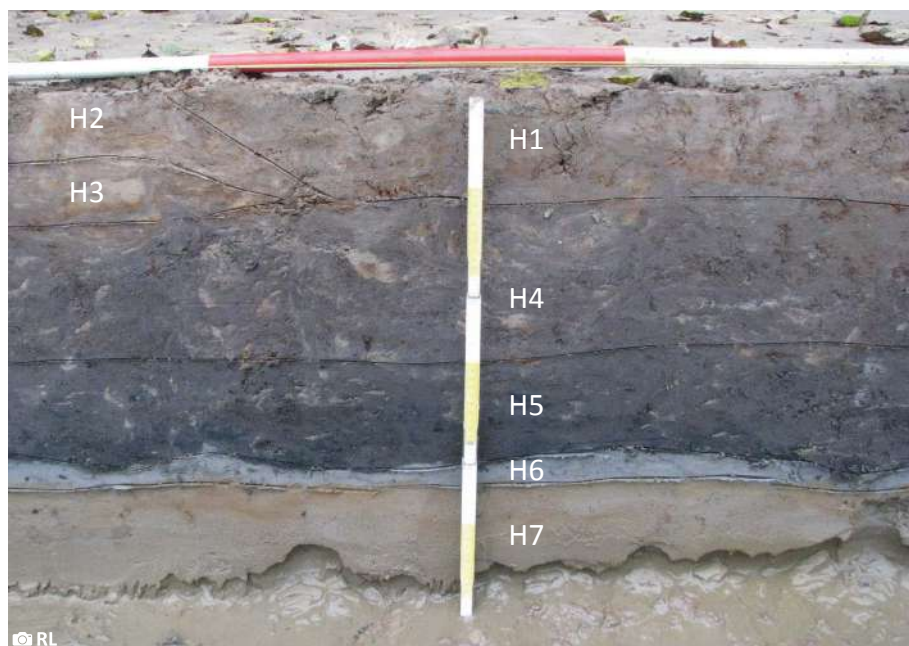
Fig. D46: Detail van horizonten H8, H10 en H11.

Interpretatie:

In H10 was het ijzer sterk gereduceerd door waterverzadiging en accumulatie van excrementen en urine, waardoor de microbiologische activiteit sterk actief was. Ijzer is met fosfaat gemigreerd naar H11.



Fig. D47: Een vroegere drinkpoel. De toegang was aan de linkerkzijde. Aalter Woestijne, provincie Oost-Vlaanderen, België.



H1 tot H5: poelvullingen met aan de onderzijde een hoger gehalte aan organisch materiaal; aan de bovenzijde is het sediment meer geoxideerd. De vijf horizonten zijn sterk gehomogeniseerd door het ploeteren: de afzonderlijke pootsporen zijn niet meer herkenbaar.

H6-H7: onder de poelvulling:

- H6: vandaag nog steeds een sterk gereduceerde horizont met lichtblauwe kleur te wijten aan vivianiet, een ijzerfosfaat.
- H6/H7: op de grens een zeer fijne neerslag van geoxideerd ijzer en mangaan.
- H7: de niet verdichte horizont onder de poelbodem.

Fig. D48: Detail van de stratigrafie.

Periglaciale involuties niet te verwarren met instulpingen gevormd door ploeteren (figuren D49-D52)



Fig. D49-D52: Vier voorbeelden van periglaciale involuties, deze mogen niet verward worden met de voorbeelden van ploeteren in figuren D20, D36, D37 en D42. Fig. D49: Vlaamse Vallei, provincie Oost-Vlaanderen, België; fig. D50: Atkár groeve, comitaat Heves, Hongarije; fig. G51: Condroz, België; Fig. 52: Laon, departement Aisne, France.

Vorming van terrasjes door betreding

Min of meer parallelle terrasjes kunnen zich vormen op hellingen waar het vee regelmatig passeert. Dit proces is zeer actief op bodems die erg nat zijn, zoals in perioden van zware regenval of dooi van sneeuw. Waar grote kuddes frequent passeren kan deze mi-

crotopografie uitgestrekte oppervlakten beslaan. Deze morfologie komt het meest voor op weilanden (figuren D53-D55), maar is ook te vinden in begraasde bosgebieden. De hoeveelheid grond die door dit proces de helling afdaalt, is beperkt, maar de eerste decimeters van de bodem zijn sterk verstoord.



Fig. D53-D55: Wanneer het vee de bodem op hellingen constant vertrappelt, kunnen er zich terrasjes vormen die niets te maken hebben met menselijke activiteiten. Fig. D53: Dolomieten, Italië; fig. D54: Noorwegen; fig. D55: Bamboutos, Kameroen.

Rustplaats, rol- en wrijflocaties

Veel dieren vertoeven bij voorkeur samen op uitgekozen **rustplaatsen**. Voorbeelden zijn schaduwplekken onder bomen (figuur D14) of heuveltoppen waar de wind een verkoelende impact heeft en waar insecten minder actief zijn (figuren D15-D17). Op zo'n locaties verdwijnt de kruidenvegetatie door het intensief vertrappelen, waardoor water- en winderosie actief kunnen worden (figuur D17).

Paarden en ezels, maar ook andere dieren zoals herten en wilde zwijnen, **rollen** om verschillende redenen en op verschillende plaatsen in de natuur. Soms zoeken de dieren een vochtige plek om zichzelf te bedekken met een korst die hen beschermt tegen hitte en/of parasieten en andere insecten (figuren D56, D57). Soms hebben ze liever een droge plaats om zich te krabben en te bedekken met stof of om dode haren te verwijderen tijdens de ruiperiode (figuur D58).

Dieren kunnen ook een boom of een rots kiezen om tegen te **wrijven** (figuur D59).

De activiteiten van rollen en wrijven gebeuren vaak op dezelfde plaats. Dit kan een depressie veroorzaken met een diameter van enkele meters en een diepte van enkele decimeters. Soms wordt deze depressie omgeven door een zone waar de oorspronkelijke bodem bedekt wordt door een laagje grond, onbedoeld door de dieren aangebracht, of afgezet door erosie van water of wind uit de kale zone. Door de zware betreding wordt de bodem op deze locaties erg verdicht en kan neerslagwater daar lange tijd blijven staan, ook op plekken waar geen grondwater in de bodem aanwezig is.

Een concentratie van artefacten of een archeologische structuur die zich op deze plaatsen bevond, zal aanzienlijk verstoord worden.



Fig. D56-D57: Rolplaats van varkens en everzwijnen, een extreem geval van ploeteren door het woelen. Val d'Ese, Bastelica, Corsica, Frankrijk.



Fig. D58-D59: Bodemverstoring op rol- en wrijflocaties. Fig. D58: Vlaams natuurreervaat De Westhoek, De Panne, België; fig. D59: Averbode, provincie Vlaams-Brabant, België.

Lik- en geofagiesites

Dieren kunnen stenen of rotsen **likken** om een beetje nutriënten op te nemen die vrijkomen door de fysische en/of chemische verwerking. Na veelvuldig verblijf op deze locaties wordt het bodemoppervlak kaal en kan erosie optreden (figuren D60-D64).



Fig. D60-D61: Liksite. De bodem rond de steen is sterk vertrappeld, de vegetatie is vernietigd. Het water stagneert op de verdichte bodem. Pradell, Lles, Cerdanya, Spanje.

Fig. D62-D64: Liksites en hiermee geassocieerd bodemvertrappeling en erosie. Pradell, Lles, Cerdanya, Spanje.

Geofagie bestaat uit het eten, althans gedeeltelijk, van aarde. In sommige culturen, is het een gewoonte voor zwangere vrouwen om 'rode' grond te eten. Hierdoor vullen ze hun dieet aan met sporenelementen, waaronder ijzer. In andere gevallen helpt deze praktijk een toxisch effect van bepaalde voedingsmiddelen te neutraliseren. Bij dieren zoals runderen (figuren D65-D67), paarden (figuren D68-D69) en schapen (figuren D70-D71), levert geofagie bepaalde zouten of kalk. De dieren eten grond vanuit een talud met kale grond of ze kunnen eerst met hun poten een holte uitgraven, meestal op een helling.

Na verloop van tijd ontstaat er zo een klein terras in de vorm van een halve maan waarvan de wand geleidelijk afkalft. Op het terras wordt de grond sterk vertrappeld waardoor de kolonisatie door vegetatie uitblijft.

Elke concentratie van artefacten of archeologische structuren op deze locaties dreigt vernietigd te worden.

300 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



Fig. D65-D67: Drie voorbeelden van geofagie door runderen. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.



Fig. D68-D69: Voor- en zij aanzicht van een site van geofagie door paarden. Serra de Cadí, Cerdanya, Spanje.



Fig. D70-D71: Bodemprofiel in kalkrijke löss. Tussen 140 en 160 cm sporen van tanden van schapen die kalkrijke aarde komen eten. Wallertheim, Duitsland.

Doortocht en drinkplaatsen

Duidelijke bodeminstulpingen kunnen ontstaan waar dieren over een natte bodem lopen, bijvoorbeeld ter hoogte van drinkplaatsen. Wanneer dit slechts een keer gebeurt, of wanneer een nieuw sediment de instulpingen bedekt, is het spoor duidelijk zichtbaar (figuren D22-D25, D33-D44). Op intensief bezochte sites zijn de individuele sporen niet meer te herkennen en ontstaat er een redelijk homogene horizont, meestal aangerijkt met donkere organische stof en stikstof en fosfor afkomstig van excrementen en urine (figuren D26-D31, D45-D48).

Omwroeten door varkens en everzwijnen

Varkens en everzwijnen zijn alleseters. Zij zoeken naar wortels, bollen, knollen, vruchten, eikels, beukenootjes, knaagdieren, wormen, slakken, amfibieën, mollen. Sommige van deze voedingsstoffen halen ze uit de grond met hun snuit die voorzien is van een wroetschijf (figuur D72). Zo kunnen ze de bodem omwroeten tot een diepte van enkele decimeters en over een oppervlakte van verschillende aren (figuren D73, D74).

Varkens en everzwijnen kunnen bomen met een diameter van enkele decimeters ontwortelen en blokken steen met een gewicht van 100 kg omduwen (figuur D75). Wroeten kan gunstig zijn voor de biodiversiteit en voor het bestrijden van brandrisico in bossen (figuur D73, D76, D77). Voor de landbouwer zijn de gevolgen van wroeten vaak catastrofaal (figuur D74). Voor de archeoloog kan dit een ernstige bedreiging vormen, want onder bos, waar deze dieren voornamelijk leven, zijn de sites vaak relatief goed bewaard gebleven door de afwezigheid van erosie en bodembewerking.



Fig. D72: Varkens verstoren de bodem met hun wroetschijf. Extremadura, Spanje



Fig. D73: Bodemverstoring in een bosbestand door everzwijnen op zoek naar wortelstokken (rhizoma) van varens. Spa, provincie Luik, België.



Fig. D74: Weide sterk omgewoeld door everzwijnen op zoek naar regenwormen en mollen. Craenevenne, Genk, provincie Limburg, België.



Fig. D75: Een 80 à 90 kg zware steen gekanteld door everzwijnen op zoek naar wormen en andere dieren die onder de stenen schuilen en leven. Garfagnana, Italië.



Fig. D76: Bodemverstoring in een bosbestand tot 40-50 cm diep door everzwijnen op zoek naar wortels met fungi. Corsica, Frankrijk.



Fig. D77: Diepe bodemverstoring in een bosbestand door everzwijnen die komen woelen in de droge aarde. Corsica, Frankrijk.

Bevercirculatiegrachten of beverkanalen

Bevers (*Castor fiber*) zijn bekend voor het bouwen van dammen in beekvalleien. Zo ontstaan er vijvers en poelen waarin ze een hol of burcht bouwen waardoor ze predatoren op afstand kunnen houden. Minder bekend is dat bevers kanalen in de valleibodem graven, zodat ze zich veilig onder water kunnen verplaatsen. Deze kanalen hebben een breedte van 60 tot 150 cm en een gemiddelde diepte van 30 tot 40 cm (figuren D78-D80). Alle vertakkingen samen kunnen een totale lengte van 200 m bereiken (Cabbard, 2009). Het geheel lijkt soms op een systeem van draineringsloten of loopgraven gegraven door de mens (figuren D81-D85).



Fig. D78-D80: Een beverdam is vernietigd en de poel leeggelopen. Dit maakt het mogelijk om de poelbodem te onderzoeken. Deze vertoont een systeem van grachten gegraven door de bever, zodat hij zich onopgemerkt voor eventuele predatoren onder water kan verplaatsen. Wibrin, provincie Luxemburg, België.



Fig. D81-D83: Beverkanalen kan men soms verwarren met loopgraven uit oorlogsperioden zoals te zien op deze figuren. Links en midden: Pays de Bray, Frankrijk; rechts Zoniënwood, België.



Fig. D84-D85: Beverkanalen niet te verwarren met draineringsgrachten zoals te zien op deze figuren. Fig. D84: Dijlevallei, België.
Fig. 85: Polder, Koksijde, provincie West-Vlaanderen, België.

2.2. Dieren die graven

De impact van gravende dieren wordt besproken van groot naar klein.

Grote gravers: dassen, konijnen, vossen, honden, wolven, bevers

Inleiding

De grote gravers maken gangen om daar in te wonen en te schuilen. Het zoeken naar voedsel vindt plaats in de open natuur. Omdat het moeilijk is om grote hoeveelheden uitgegraven grond naar boven te verplaatsen, worden de gangen bij voorkeur in relatief losse aarde vanaf een helling uitgegraven (Do Linh San, 2006), zoals bijvoorbeeld op heuvels, duinen of langs beken en rivieroeveren. In vlakten of op plateaus is dit veel moeilijker en dikwijls zijn de enige plaatsen die een helling hebben, archeologische structuren zoals sloten, wallen (figuur D100), *tumuli* (figuur D101) of houtskoolmeilers (figuren D96, D97). Deze biologische graafactiviteit kan catastrofaal zijn voor het behoud van de originele interne structuur van deze archeologische elementen. Een belangenconflict is hier niet uitgesloten. Zo wordt soms een *tumulus* geregistreerd als natuurreservaat om de dassen die zich daar vestigden te beschermen (Lenaerts, 2015). <https://www.hln.be/tongeren/dassen-mogen-in-grafheuvel-blijven~ac65abdd/>

De das en vos

In Vlaanderen is de **das** (*Meles meles*) het grootste dier dat een gangenstelsel met verschillende holen of kamers graaft. Het geheel wordt een dassenburcht genoemd: het is een labrynt van gangen en kamers met doorgaans 3 tot 7 uitgangen (figuren D86, D87) (e.g. Conings, 1989; Do Linh San, 2006). Vaak zijn er verschillende kamers: de belangrijkste is de kraamkamer, die bijna permanent bezet is en waar het vrouwtje bevalt. Daarnaast zijn er een of meerdere secundaire kamers die tijdelijk gebruikt worden. De gangen hebben een diameter die vaak groter is dan 25 cm en ze kunnen een lengte van meer dan 100 m bereiken. Het totaal aan verplaatste grond kan meer dan enkele tientallen kubieke meter bedragen. Het is niet ongebruikelijk dat de bovenste gangen instorten met als resultaat een golvend bodemoppervlak met depressies en bulten (figuren D88, D89).

De impact van dassen op archeologische sites doorheen Frankrijk wordt uitvoerig besproken door Malley (2007).

De oudste vondst van dassenbeenderen in Vlaanderen is afkomstig van een steengroeve te Zemst en wordt geschat op 120.000 jaar oud (Criel, 1997). Voor vondsten op archeologische sites wordt Oudenaarde Donk vermeld, ze dateren van het neolithicum (± 5.000 jaar oud). In Wallonië zijn er vondsten gemeld te Luik, daterend van ± 5.300 - 5.250 B.C. (Van Der Plaetsen, 1990).

De **vos** (*Vulpes vulpes*) kan eveneens graven (figuren D90, D91), maar hij nestelt zich graag in de gangen die door anderen zijn gegraven, zoals die van de das, eventueel met enkele aanpassingen. Soms kunnen de das en de vos zelfs samenwonen (Do Linh San, 2006).



Fig. D86: Dassenburcht op een talud (achtergrond) in een leembodem. Wanneer de gangen instorten, wordt een nieuw microreliëf gevormd. Riemst, provincie Limburg, België.



Fig. BD87: Doorsnede van een dassenburcht. Zwitserland.



Fig. D88: Dassenburcht op de helling van een talud van een oude groevewand (linkerkant) in een leembodem. Het micro-reliëf wordt gevormd door het instorten van gangen. Riemst, provincie Limburg, België.



Fig. D89: Uitgesproken microtopografie door het gedeeltelijk instorten van een dassenburcht. Oever langs de Meille Thielle beek, Neuchâtel, Zwitserland.



Fig. D90-D91: Nesten van vos op de helling van een zandgroeve. Groenendaal, Zoniënwoud, Woluwe park, België.

Honden en wolven

Honden en **wolven** kunnen ook graven, niet alleen om een prooi (been) te begraven, maar ook om te schuilen tegen de winterkoude en de zomerhitte, en

vooral als ze jongen verwachten (figuren D92, D93). Het graafgedrag van honden kan een belangrijke verstoringsfactor zijn voor archeologische structuren (Jeske & Kusnar, 2001).



Fig. D92: Ook de hond kan, net als de wolf, flink graven. Budapest, Hongarije.



Fig. D93: Voorbeeld van een hondennest. Vinales, Cuba.

Konijnen

Konijnen (*Oryctolagus cuniculus*) werden in de veertiende eeuw in de Nederlandse kuststreek geïntroduceerd (Klijn, 1981: 59). De eerste vermelding in België dateert van enkele eeuwen eerder, de twaalfde eeuw (Lauwerier & Zeiler, 2001). De verspreiding zou sterk verbonden zijn met de kloostergemeenschappen (figuren D98, D99) en de aristocratie.

Konijnengangen zijn kleiner in vergelijking met die van dassen (figuren D96, D97, D102), maar de populatiedichtheid van konijnen kan veel hoger zijn (figuren D94, D95, D98, D99). In het verleden werden soms grote populaties van konijnen kunstmatig in een warande (En.: *warren*; Fr.: *garenne*) of een afgesloten ruimte (meestal een heuvellichaam) gehouden. Daarin werd de jacht dikwijls met fretten gevoerd (Mougenot & Strivay, 2011). In België wordt ook vermeld dat bepaalde *tumuli* bewaard zijn gebleven dankzij de grote populatie konijnen die daar hun toevlucht zochten, wat de vangst gemakkelijker maakte. In het Zoniënwoud worden verstoringen door konijnen voornamelijk geobserveerd ter hoogte van houtskoolmeilers (figuren D96, D97).



Fig. D94: Verplaatsing van grond door een konijn. Oostvoorduin, Koksijde, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. D95: Concentratie van konijnengangen in de Cabourduinen, De Panne, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. D96-D97: Op plateauopposities zoeken de konijnen naar hellingen om hun gangen te graven. Hier een houtskoolmeiler sterk verstoord door de graafactiviteit. Rechts van het meetlint de 'ongestoorde' bodem van de meiler. Zoniënwoud, Ukkel, België.



Fig. D98-D99: Concentratie van konijnengangen ter hoogte van de Duinenabdij van Koksijde. (Raparium Adriaan De But, 15de eeuw).

Opsporen van verdwenen *tumuli* en aarden wallen

Afgezien van het destructieve aspect, kunnen de sporen van dassen- en konijnengangen, de archeologen essentiële informatie verschaffen over de oorspronkelijke plaats van wallen of *tumuli* die nadien geëgaliseerd werden. Zo werden, tijdens opgravingen van sites uit de ijzertijd of de Romeinse periode in het zandgebied van Noord-België, concentraties van gangen geïdentificeerd net onder de huidige, ongeveer 30 cm dikke ploeglaag (Langohr, 2004). Oorspronkelijk waren deze gangen leeg en is het duidelijk dat deze dieren zo'n netwerk niet kunnen graven op slechts 30 cm diepte in een zandgrond. Dit wijst erop dat er op deze plaatsen oorspronkelijk een heuvellichaam aanwezig was zoals een *tumulus* (figuur D101) of een aarden wal (figuur D100). Nadat de sites, in een gebied met een zeer vlak reliëf en een ondiepe grondwatertafel, door de mens waren verlaten, vestigden de dieren zich bij voorkeur in deze verhoogde structuren. Later werd alles genivelleerd, vermoedelijk om gemakkelijker aan landbouw te kunnen doen, waardoor alleen de diepste sporen van het gangennetwerk achterbleven.



Fig. D100: Spoor van een konijnengang gevuld met humusrijke aarde, vermoedelijk ter hoogte van een aarden wal die nu verdwenen is. Aalter, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. D101: Sporen van een dassengang juist onder de ploeglaag in de zandstreek. Oorspronkelijk bevond deze gang zich in een wallichaam van een Romeins kamp. De wal is later genivelleerd om het perceel als akker te gebruiken. De zwarte aarde in de gang is zeer rijk aan humusstoffen, afkomstig van de vertering van een wortelmassa die de gang volledig vulde toen de dassen hun nest hadden verlaten. Door instortingen tijdens het afbraakproces van de wortels is het spoor van de gang breder dan de oorspronkelijke gang. Romeins Kamp van Maldegem-Vake, Maldegem, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Langohr, 2004; Pieters, 1986).

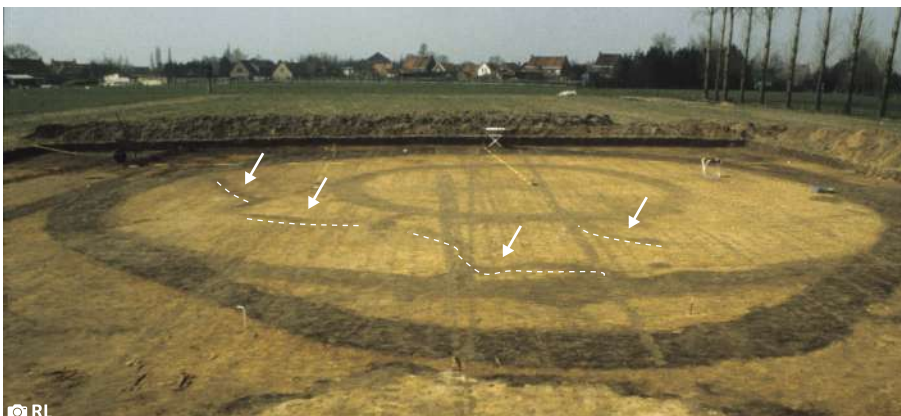


Fig. D102: Dubbele gracht geassocieerd met een *tumulus*. De pijlen en streepjeslijnen tonen de konijnen- of dassengangen gevuld met zwarte aarde. De aanwezigheid van deze sporen, juist onder de huidige zandige ploeglaag, wijst erop dat er hier vroeger een heuvel was. Ursel, Rozestraat, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Bourgeois, 1990; Bourgeois & Rommelaere, 1991).

De zwarte aarde in de verlaten gangen

Op archeologische vindplaatsen kunnen gangen die eeuwen geleden verlaten zijn, soms worden opgespoord door hun donkere humusrijke vulling. In tegenstelling tot wat men zou denken, is deze aarde zelden afkomstig van de zwarte oppervlaktehorizont. Deze aarde kan onmogelijk een meterslange gang met een onregelmatige topografie volledig opvullen (figuren D100, D101, D103, D104). De oorsprong van de vulling moet worden gezocht in post-depositionele processen waarbij wortels een belangrijke rol spelen.

Eens de gang verlaten is, kunnen wortels zich vrij ontwikkelen in deze open ruimte die na een tijd volledig gevuld geraakt met wortelmasa. Deze structuur wordt een 'vossenstaart' genoemd (figuren D105, D106) en is goed gekend in de landbouw, omdat de wortels een draineringsbuis volledig kunnen verstoppfen. Na het afsterven van de wortels wordt de gang ingenomen door talrijke organismen zoals regenwormen, mieren, kevers, insectenlarven en micro-organismen. Door al deze biologische activiteit zullen de wanden van de gang gedeeltelijk afbrokkelen en zal de minerale grond zich met de donkere humusstoffen vermengen. Het eindresultaat is **een spoor dat groter en onregelmatiger is dan aanvankelijk**. De structuur is gevuld met zwarte aarde rijk aan organisch materiaal dat niet afkomstig is van de oude ingang, maar van de originele wanden van de gangen.

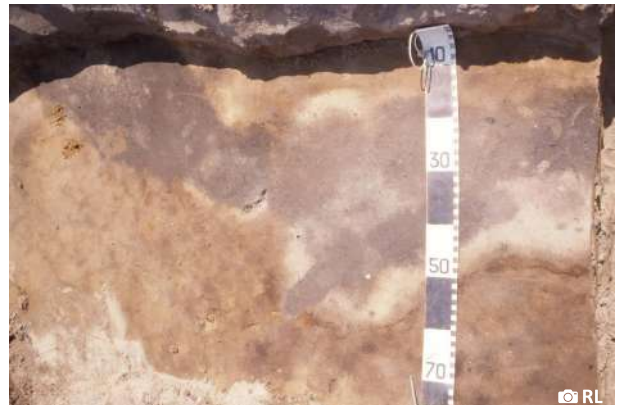


Fig. D103-D104: Een grachtvulling met een spoor van een konijnengang. De zwarte aarde van deze horizontale gang kan onmogelijk afkomstig zijn van de humusrijke oppervlaktehorizont en is het gevolg van de vertering van de wortelmasa die de gang heeft opgevuld. De oorspronkelijke gang was kleiner. Ussel, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. D105-D106: Het uittrekken van een 2,5 m lange 'vossenstaart', een wortelmasa, uit een draineringsbuis. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.

Bevers

Bevers staan bekend voor hun burcht in de vorm van een 'hut' omgeven door water. Maar als de oevers een helling hebben en de bodem niet al te steenachtig is, graven ze liever een hol in de vaste grond. De ingang van de burcht is onder water, gevolgd door een steile gang van 2 tot 3 m lang die naar een kamer leidt met een gemiddelde afmeting van 90 cm lang, 80 cm breed en 50 cm hoog (Cabbard, 2009). Soms zijn er meerdere kamers. Vaak is de kamer voorzien van een min of meer verticale pijp van 15 tot 30 cm doorsnede waardoor ventilatie en afvoer van warmte mogelijk is. De aarde uit deze hollen, waarvan het totale volume varieert tussen ongeveer 0,8 en 1,5 m³, komt terecht in de waterloop of vijver.

Het graven van kanalen door deze dieren op de bodem van overstroomde valleien is besproken in §2.1 (Fauna die het bodemoppervlak verstoort/Bevercirculatiegrachten of beverkanalen) (figuren D78-D80).

Middelgrote gravers

Ratten, hamsters, muizen, padden...

De gangen van deze dieren zijn middelgroot, variërend van enkele centimeters tot ongeveer een decimeter in diameter. Net als de grote gravers, schuilen deze dieren in de grond, maar zoeken ze meestal hun voedsel buiten hun nest. Slechts enkele van deze dieren worden hier kort besproken.

Bij het graven van hun gangen die erg onregelmatig van vorm zijn, valt ook hier de verplaatste aarde er niet terug in. In het geval van een grote concentratie aan gangen, kunnen instortingen aan de oppervlakte lokaal een microreliëf veroorzaken over enkele vierkante meter en tot enkele decimeters diep.

De **bruine** (*Rattus norvegicus*) en **zwarte rat** (*Rattus rattus*) graven een gangenstelsel met een diameter van 5 à 9 cm, dat zelden dieper gaat dan 60 cm.

Het gangenstelsel en kamers gegraven door de **hamster** (*Cricetus cricetus*) worden eveneens een 'burcht' genoemd (Christiaens & Verwaerde, 1998). In dezelfde publicatie wordt hun verspreiding in Vlaanderen besproken.

In Vlaanderen komen negen soorten **muizen** voor. De meeste soorten graven gangen voor de aanleg van een verblijfplaats. Sommige soorten zoals de woelmuis en de aardmuis, graven een gangenstelsel tot 30 cm diep op zoek naar wortels, bollen en knollen.

De **rugstreeppad** (*Epidalea calamita*) brengt de winter door in een zelf gegraven hol dat tot een halve meter diep kan zijn (<https://www.natuurpunt.be/soorten/amfibieen-reptielen/rugstreeppad>).

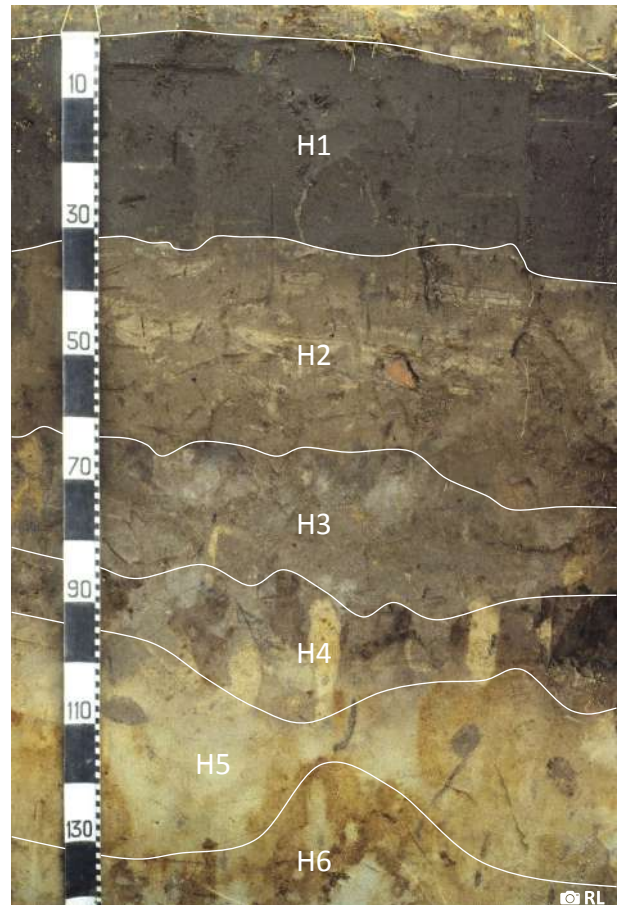
De vulling van gangen – *crotovinas*

Eenmaal een gegraven gang door dieren wordt verlaten, kan die vrij vlug verdwijnen. Meestal verloopt dit proces snel, vooral ter hoogte van de losse oppervlaktehorizonten waar sterke bioturbatie plaatsvindt door gravende dieren en/of door een beplanting met een snelgroeiend dicht wortelstelsel, zoals in begraasde weiden.

In veel gevallen zijn de gangen echter op het moment van het verlaten ervan, gevuld met aarde die vaak van hogere horizonten komt (Ponomarenko D. & E., 2019). Het tegenovergestelde, namelijk dat de gangen gevuld zijn met aarde van de onderliggende horizont, kan ook gebeuren (figuren D107, D108). Dergelijke opgevlude structuren noemt men '*crotovinas*' (van het Russische '*krotóvina*': molshoop). Sommige horizonten kunnen soms voor meer dan de helft uit *crotovinas* bestaan (figuren D107-D114). Het is duidelijk dat in deze gevallen aanzienlijke verplaatsingen van de artefacten te verwachten zijn.

Crotovinas kunnen gebruikt worden voor de reconstructie van het milieu. Zoals vermeld kan een *crotovina* samengesteld zijn uit aarde afkomstig uit bovenliggende horizonten. In het geval dat deze horizonten verdwenen zijn, bijvoorbeeld door erosie of bodembewerking, kan de *crotovina* aanwijzingen geven over de vroegere aanwezigheid ervan.

Fig. D107: Deze podzolbodem had een belangrijke regenwormpopulatie wat er op wijst dat het perceel vroeger een begraasde weide was (bevestigd aan de hand van keverresten). Bovendien is de bodem intensief gebioturbeerd door foeragerende mollen. Hoge Weg, Gent, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Pieters, 1986).



- H1: 0-30/40 cm: Ap1; huidige ploeglaag, regenwormgangen, maar geen sporen van mollen.
- H2: 30/40-62/77 cm: Ap2; tweede ploeglaag, regenwormgangen maar geen sporen van mollen.
- H3-H5: restanten van een begraven podzol.
 - H3: 62/77-80/93 cm: E; oorspronkelijk lichtgrijze uitlogingshorizont, sterk gebioturbeerd door mollen.
 - H4: 80/93-91/110 cm: Bh; sterk gebioturbeerde podzol B-horizont.
 - H5: 91/110-118/140+ cm: C; zandig moedermateriaal.
- H6: 118/140+ cm: Bt.

Fig. D108: Detail van fig. D107. Horizontaal vlak op 70 cm diepte ter hoogte van de uitlogingshorizont (H3). Ongeveer 50 % van de bodem is gebioturbeerd door mollen. De donkergrijze en zwarte gangvullingen zijn afkomstig van de hoger gelegen humusrijke horizonten. De geelbeige gangvulling is afkomstig van de diepere horizonten. Artefacten kunnen dus ook naar boven migreren. Deze contrasterende vullingen tonen aan dat de gangen niet leeg waren. Tijdens zijn zoektocht naar regenwormen die diep in de bodem estiveren, duwt de mol de vergraven grond achter zich.

In droge periodes zullen regenwormen zich diep ingraven tot waar de bodem nog vochtig is. Op deze diepte graven ze zomerkamers waarin ze zich ophouden om de droge periode door te brengen. Deze rustperiode wordt estivatie genoemd (zie § 2.2 Dieren die graven/Kleine gravers/Regenwormen). In de bovenste 70 cm (H1+H2) zijn er wel sporen van regenwormen maar niet van mollen. Vandaag is het perceel als akker in gebruik die regelmatig bewerkt wordt, waardoor mollen zich niet kunnen vestigen.

312 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



Fig. D109-D110: Regenwormgangen en sporen van mollen. Meer dan 50 % van de bodem is gebioturbeerd. Dit wijst op een periode van begrazing (weiland). Het horizontaal verloop van de mollengangen geeft aan dat de regenwormen op deze diepte aanwezig waren. Site Sint-Pietersplein, Gent, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. D111-D112: Een grachtvulling sterk gebioturbeerd door mollen en regenwormen. De mollengangen verlopen verticaal wat wil zeggen dat de regenwormen dieper estiveren. De begrenzing van de gang is scherp, wat er op wijst dat de gang relatief recent is gegraven. Oedelem, provincie West-Vlaanderen, België. (Meganck & Fockedeij, 1995).



Fig. D113-D114: Een grachtvulling met talrijke sporen van mollengangen. De begrenzing van de gangen is onscherp wat wijst op een relatief oude verstoring. Oostkamp, provincie West-Vlaanderen, België. (Van de Vijver *et al.*, 2009).

Mollen

Onder de gravende dieren vormen **mollen** (*Talpa europea*) (figuur D115) een bijzonder geval. Ze wonen en schuilen niet alleen in de grond, ze zoeken daar ook hun voedsel met als gevolg dat ze heel hun leven zeer intensief graven.

Mollen zijn voornamelijk vleesetende dieren met als hoofdvoedsel regenwormen, insecten, larven, kleine zoogdieren en amfibieën.

We kunnen drie soorten gangen onderscheiden:

1. Gangen en verblijfsruimten die openblijven zolang de dieren ze gebruiken. De uitgegraven aarde wordt aan het bodemoppervlak afgezet.
2. Oogstgangen, oppervlaktegangen, mollenritten, die zich net onder het bodemoppervlak bevinden. Deze gangen kunnen enkele dagen tot weken openblijven en dienen voor het vangen van insecten en wormen die in deze open ruimte belanden. Deze gangen kan men herkennen aan een reeks uitgelijnde molshopen aan het oppervlak (figuren D117-D120).
3. De jachtgangen waar de mol zijn voedsel vangt tijdens het graven. Deze gangen worden uitgegraven tot de diepte tot waar de prooi zich ophoudt. Deze gangen kunnen dus gerust op meer dan een meter (Dunwell & Trout, 1999) en zelfs tot 2m diep voorkomen (figuur D4). Het is duidelijk dat de mol niet al deze aarde naar de oppervlakte kan brengen tijdens het graven (kosten-baten verhouding). De techniek is daarom om de aarde simpelweg naar achter te duwen (figuren D107, D108). De gang blijft zo grotendeels opgevuld met aarde. Als het dier naar beneden graaft, wordt de aarde die van een lagere horizont komt, omhooggeduwd. Aan de andere kant, wanneer het dier omhoog graaft, zal het de aarde van de hogere horizonten naar beneden duwen. Wat geldig is voor de aarde, geldt natuurlijk ook voor de artefacten en ecofacten. Dit is dus een van de processen waarbij artefacten naar boven kunnen migreren (figuur D121).

In goede leefcondities kunnen mollen grote hoeveelheden aarde verplaatsen (figuur D116). Ohel (1987) vermeldt ongeveer een ton aarde per km² in één seizoen.

In Vlaanderen wordt de meest intense bioturbatie door mollen geobserveerd in begraasde weiden (figuur D116). Dit ecosysteem wordt immers weinig verstoord door ploegen en door de aanvoer van

uitwerpselen en urine is de bodem rijk aan stikstof en fosfor. Dit schept zeer gunstige omstandigheden voor grote populaties van regenwormen en mestkevers wat de mol ten goede komt.

De mol vermijdt bodems met een (tijdelijke) grondwatertafel (figuur D122).



Fig. D115: Mol



Fig. D116: De concentratie van molshopen is zeer groot tegen het einde van de winter wanneer de dieren intensief naar voedsel zoeken. Füllinsdorf, Zwitserland.



Fig. D117: Een foerageegang. Roosendaal, provincie Noord-Brabant, Nederland.



Fig. D118-D120: Deze mollen hebben een lange gang gegraven die zij regelmatig doorlopen om wormen en insecten te vangen die in de gang zijn terechtgekomen. De kleur van de aarde geeft informatie over de diepte van de gang. Fig. D118: Cerdanya, Spanje; fig. D119: Ten Haagdoornheide, Houthalen-Helchteren, provincie Limburg, België; fig. D120: Texas, USA.



Fig. D121: Een molshoop met naar boven gebracht grind (artefacten). Cerdanya, Spanje.



Fig. D122: Slingerende depressie die geregeld onder water staat. Regenwormen en mollen mijden deze zone, de bioturbatie door deze dieren blijft dan ook uit. Vlaams natuurrreservaat Zwinduinen en -polders, Knokke, provincie West-Vlaanderen, België.

Kleine gravers

Er zijn talrijke invertebrata die sporen nalaten in de bodem en die verantwoordelijk zijn voor bioturbatie (Bret & Fagerstrom, 1980) (figuren D123-D128, D133-D141, D166-D190). De soorten die een belangrijke impact hebben op Belgische bodems worden hieronder besproken.

Bepaalde milieuomstandigheden zijn gunstiger voor bioturbatie. Bodems rijk aan stikstof, kalkrijke bodems met een zuurtegraad van meer dan 6 (figuren D1-D5, D144-D152) en plaatsen onder hagen zijn aantrekkelijker (figuren D128-D130).

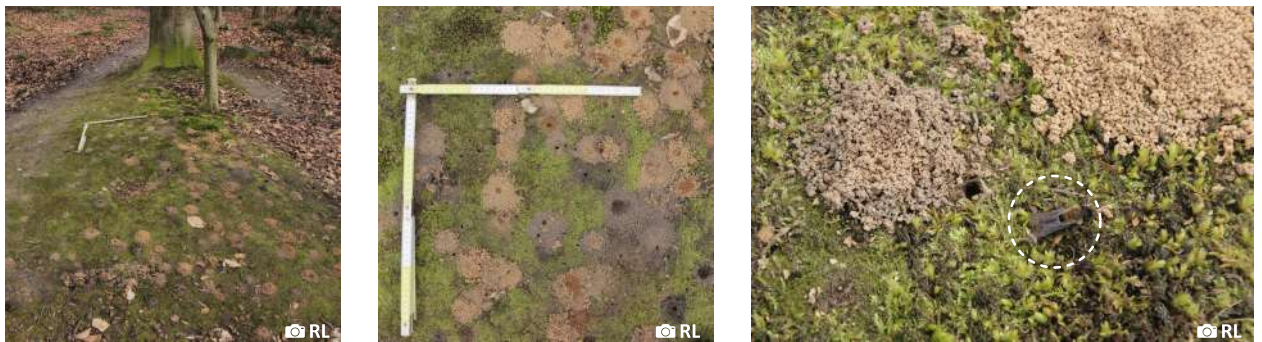


Fig. D123-D125: Concentratie van de graafactiviteit van wilde (of solitaire) bijen (zie cirkel) in een leembodem. De kleur van de aarde geeft aan tot op welke diepte de dieren graven. Verrewinkelbos, Ukkel, België.



Fig. D126-D128: Graafactiviteit van een mestkever. De kleur van de aarde toont dat de kever materiaal van drie verschillende bodemhorizonten naar de oppervlakte heeft gebracht. Rechts is materiaal van twee horizonten zichtbaar. Zoniënwood, Ukkel, België.



Fig. D129: Bodem onder een oude haag in de zandleemstreek. De eerste 80 cm van de bodem zijn gebioturbeerd door dieren en plantenwortels. Edegem-Buizegem, provincie Antwerpen, België.



Fig. D130-D131: Bodem onder een oude haag. De bodem is volledig gebioturbeerd door fauna. Terralba, Italië.

Mestkevers

Diverse soorten kevers graven intensief in bodems. De veenmol en de meikever zijn maar enkele voorbeelden. In dit document bespreken we de mestkevers die door hun diepe gangen het best observeerbaar zijn in de bodem.

In de natuur, waar uitwerpselen te vinden zijn van bijvoorbeeld konijn, schaap, hert, ree of andere grazers zoals koeien, paarden, komen mestkevers voor en ontstaan er gaten in de grond (figuren D132-D135) (Brussaard, 1986). Deze mesthopen trekken een hele reeks andere dieren aan zoals vliegen en wormen (Gobat *et al.*, 2010), maar in de context van bodembioturbatie zijn de **mestkevers** het belangrijkste.

Naargelang het type mest (rund, schaap ...), zal de keversoort verschillen, maar allemaal slaan ze een deel van deze voedingsstof op in ondergrondse gangen waar ze hun eieren leggen in 'mestbollen', 'mestproppen' of 'mestworstjes'. Meestal gaan de gangen tot enkele decimeters diep, maar sommige soorten graven gangen tot 1,5 m diepte (zie kader laatglaciale mestkeverpopulatie). De diameter van een verticale gang kan tot 2 cm groot zijn, in vergelijking hiermee hebben de gangen van de grote regenworm maar een diameter van maximaal 9 mm (figuren D136-D138, D188). De gangen eindigen in een tunnelkamer met een diameter tot 3 à 4 cm gevuld met een of meerdere mestproppen (figuren D139-D141).

Wanneer de larve uit het ei is gekropen, eet ze ten minste een deel van de vermalen uitwerpselen van het mestworstje. Na het verpoppen en de ontwikkeling tot een jong adult, zal de mestkever zich een weg naar het oppervlak graven, hetzij langs de oude verstopte gang, hetzij door een nieuwe gang te graven. Herbivoren produceren verhoudingsgewijs een veel grotere hoeveelheid uitwerpselen dan alseeters of carnivoren. Het is dan ook vooral in begraasde weiden in vergelijking met bossen en akkers dat mestkevers het meest actief zijn. Op archeologische sites kan het opsporen van mestkeveractiviteit informatie geven over de plaats waar het vee bijeenkwam (Smith *et al.*, 2014) tijdens of na de occupatieperiode zoals geobserveerd te Doel (figuren D186-D188). Dit soort onderzoek is in de Belgische archeologie intensief gevoerd (Ervynck, 2009).

Een explosie van mestkevers in het Laatglaciaal

Studies van paleobodems daterend uit het Laatglaciaal (Brussaard & Runia, 1984) tonen talrijke sporen van min of meer verticale gangen van mestkevers die in goed gedraineerde bodems tot ruim een meter diep gaan. Deze uitzonderlijke activiteit kan in verband worden gebracht met de aanwezigheid van veel uitwerpselen van herbivoren, mogelijk onder andere van rendieren in combinatie met de afwezigheid van predatoren en pathogenen (Dwyer *et al.*, 2004).



◀ Fig. D132: Mestkevers op een verse koeienvlaai. Krk eiland, Kroatië.



► Fig. D133: Mestkever verplaatst een mestbal. Ras El Maa, Ifrane, Marokko.



◀ Fig. D134: De mest is al voor een groot deel verwerkt in de ondergrondse gangen, waarvan de aarde nu aan het bodemoppervlak ligt. Vlaams natuurreservaat De Westhoek, De Panne, provincie West-Vlaanderen, België.



► Fig. D135: Bodemoppervlak met grondballen opgegraven door mestkevers. Vlaams natuurreservaat Houtsaegerduinen, De Panne, provincie West-Vlaanderen, België.

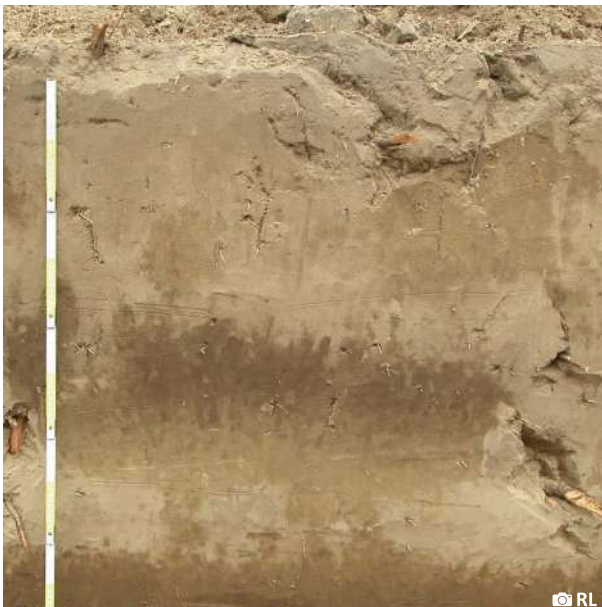


Fig. D136: Een begraven humusrijke oppervlaktehorizont doorboord door talrijke mestkevergangen. Fig. D136-D138: Zoltán, Hongarije.



Fig. D137-D138: Horizontaal vlak met talrijke mestkevergangen. De licht gekleurde sporen komen van een hogere horizont, de beige gekleurde sporen behoren bij de onderliggende horizont.



Fig. D139: Bodemprofiel met twee mestproppen. Fig. D139-D141: Vlaams natuurreservaat De Westhoek, De Panne, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. D140: Proppen mest in ondergrondse gangen in een duinbodem.



Fig. D141: Mestproppen of mestworstjes gevormd door het samendrukken van mestballen in een broedkamer waarin een eitje wordt gelegd. Nadat de larven uitkomen zullen ze eerst deze voedingsstof verteren.

Regenwormen

Er bestaat een zeer uitgebreide literatuur over **regenwormen** en bodems. Ook in de archeologie is het effect van regenwormactiviteit op archeologische sites intensief onderzocht zie bijvoorbeeld de publicaties Stein, 1983; Armour-Chelu, & Andrews, 1994; Canti, 2003, 2005. Voor een synthese over de ecologie en de impact van deze dieren op de bodem is het boek van Bouché (2014) een absolute aanrader.

Wat betreft hun graafgedrag, kan men drie groepen regenwormen onderscheiden (Gobat *et al.*, 2010).

1. De epigeïsche soorten leven hoofdzakelijk in de strooisellaag en de bovenste humusrijke bovengrond. Ze eten strooisel en dood hout. Voor het archeologisch onderzoek is hun impact te verwaarlozen.
2. De endogeïsche soorten leven in de toplaag van de bodem. Ze graven gangen die vaak horizontaal lopen en net onder het maaiveld liggen. De 'geofagen' eten aarde, de 'rhizofagen' wortels. De aarde die ze naar de oppervlakte brengen, valt niet zo snel terug in de gang. Hierdoor kunnen de artefacten die zich aan het oppervlak bevinden, begraven worden (zie kader Darwin, regenwormen en archeologische structuren).
3. De anekische soorten of pendelaars zijn de grootste wormen: ze graven diepe, verticale tunnels. In Vlaanderen is de **gewone regenworm** (*Lumbricus terrestris*) de grootste en meest voorkomende anekische worm. Hij kan een lengte van 10 tot 30 cm bereiken. De gangen hebben een diameter van ongeveer 6-8 mm. Deze dieren vinden hun voedsel, zoals bladeren en ander organisch materiaal, op het bodemoppervlak dat ze vooral 's nachts of tijdens sterke regenperiodes opzoeken. Ze verdragen geen droogte en graven daarom gangen die min of meer verticaal zijn en dit tot een diepte tot waar de grond nog vochtig

genoeg is om te overleven (figuren D142, D143). Dit kan tot 2 m diep gaan! De diepte tot waar de anekische regenwormen graven is dus een milieu-indicator voor het bodemvochtregime, meer specifiek voor de diepte tot waar de bodems in de zomer uitdrogen. In de Belgische leemstreek is dit tussen 80-120 cm. Om hun gangen te graven, slikken deze wormen de aarde in die ze in de vorm van aggregaten (regenwormhoopjes - En.: *wormcast* ; Fr.: *terricules*) terug op het oppervlak afscheiden. Tijdens regenachtige periodes kan minstens een deel van deze aarde aangerijkt met organisch materiaal terug in de gang glijden en deze gedeeltelijk dicht maken. Wanneer een deel van de uitgegraven aarde op de grond achterblijft, bestaat de kans dat het origineel bodemoppervlak met eventuele artefacten, geleidelijk aan begraven wordt, op voorwaarde natuurlijk dat deze grond niet erodeert (zie kader). Grote populaties van anekische regenwormen kunnen een aanzienlijke invloed hebben op de positie van artefacten in of op de bodem.

De kwaliteit en kwantiteit van voedsel en bepaalde bodemkenmerken spelen een grote rol in de populatiedichtheid van regenwormen. Gemakkelijk verteerbaar voedsel in het strooisel, zoals bladeren van populier of linde, heeft de voorkeur boven de moeilijker verteerbare bladeren van beuk of naaldbomen. Een bodem met een hoog stikstofgehalte ten opzichte van het koolstofgehalte, dit wil zeggen een C/N verhouding van 12 of minder, is ook gunstig. Regenwormen verkiezen ook een kalkhoudende bodem, slechts weinig soorten houden van een zure bodem. Bij de vergelijking tussen bos, weide of akkerland zijn het de weilanden, die de grootste populatiedichtheid van regenwormen hebben (figuren D144-D146) (Schelfhout *et al.*, 2014).



Fig. D142-D143: Regenwormen in hun estiveerkamer tijdens de zomer.

320 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

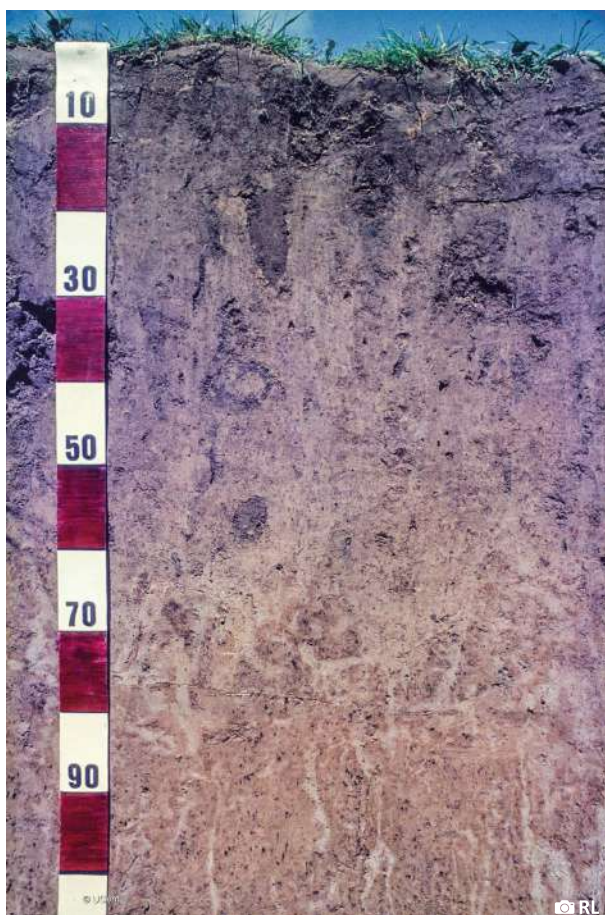


Fig. D144-D146: De bodem is gedraineerd en sedert eeuwen onder permanente weide. Dit perceel ligt vlak bij de boerderij en is intensief begraasd. Hierdoor is de bodem sterk aangerijkt met fosfor en stikstof (excrementen en urine). Als gevolg hiervan is een grote regenwormpopulatie aanwezig en vervolgens ook een belangrijke aanwezigheid van mollen. De originele bodemhorizonten zijn door de regenwormen en de mollen gehomogeniseerd tot 65 à 70 cm diepte. Eventuele archeologische sporen die zich binnen deze diepte bevonden zijn eveneens verdwenen. Fig. D144: Lac du Der-Chantecoq, Frankrijk; Fig. D145-D146: Condroz, België.

In vergelijking met bos is een groter deel van het strooisel van weides gemakkelijker te verteren en de uitwerpselen en urine van het vee leveren een C/N-verhouding die over het algemeen lager is dan 10. Bewerkte akkers zijn een minder geschikt leefmilieu voor wormen, zeker de laatste decennia met het ploegen tot 30 cm diep en het gebruik van herbiciden, pesticiden en fungiciden. Meestal blijven er na de oogst ook weinig organische resten achter aan het oppervlak. Daardoor verlaagt de concentratie aan organische stof in de bodem en verdrogen de oppervlaktehorizonten vlugger. De bodembewerking zelf is ook schadelijk voor de wormpopulatie

aangezien het deze bodemdieren aan het oppervlak brengt tot grote vreugde van vogels.

In diepe goed gedraineerde leembodems van België (figuren D147, D148) kan men op 50 cm diepte 800 tot 1200 verticale regenwormgangen tellen (figuren D149-D152). Het is belangrijk te noteren dat de wormgangen die we vandaag observeren slechts tot de laatste generaties behoren. De gangen of *crotovinas*, van eeuwen en duizenden jaren geleden zijn niet meer te zien, omdat de organische stof verteerd is door de microbiologische activiteit (figuren D1-D5).

Hoe de mens samen met de regenwormen en de mollen, de bodems van de Belgische leemstreek drastisch wijzigden (figuren D148-D152 versus D153-D157)

De bodems van de leemstreek zijn geëvolueerd van bodems met zeer lage chemische en fysische fertiliteit tot een van beste landbouwgronden van West-Europa (e.g. Antrop *et al.*, 2004; Dondeyne & Deckers, 2019). Figuren D148-D152 tonen een typische leembodem met een textuur B-horizont (Aba) met veel regenwormgangen in tegenstelling tot een droge leembodem met een verbrokkelde textuur B-horizont (Abc) (figuren D153-D155) en een hydromorfe leembodem onder bos (Adc) zonder regenwormactiviteit (figuren D156, D157).



Fig. D147: Typisch landschap van een zacht golvend oud landbouwland van de leemstreek. Waver, provincie Waals-Brabant, België.

Fig. D148: Typische leembodem voor de Belgische leemstreek (Aba), die minstens zo'n 1.000 jaar onder landbouw ligt. Ongeveer 40-50 cm van de originele bodem is geërodeerd. De grote regenwormen (*Lumbricus terrestris*) graven tot 100-120 cm diep om zich te beschermen tegen de zomerdroogte, waar ze estiveren. Deze diepte komt overeen met de diepte waarop de (prisma)structuur stopt. De graafactiviteit van de regenwormen gedurende eeuwen, evenals deze van de mollen die de regenwormen zoeken, heeft de bodem sterk gehomogeniseerd. Deze gangen worden intens gevolgd door de plantenwortels. Dankzij de talrijke verticale wormgangen is de fysische bodemfertiliteit uitstekend. De chemische fertiliteit is eveneens zeer goed door vele jaren van bemesting en bekalking. Surice, Philippeville, provincie Namen, België. (Botbol, 1973).





Fig. D149: Horizontaal vlak op 50 cm diepte met sporen van de huidige actieve regenwormpopulatie.

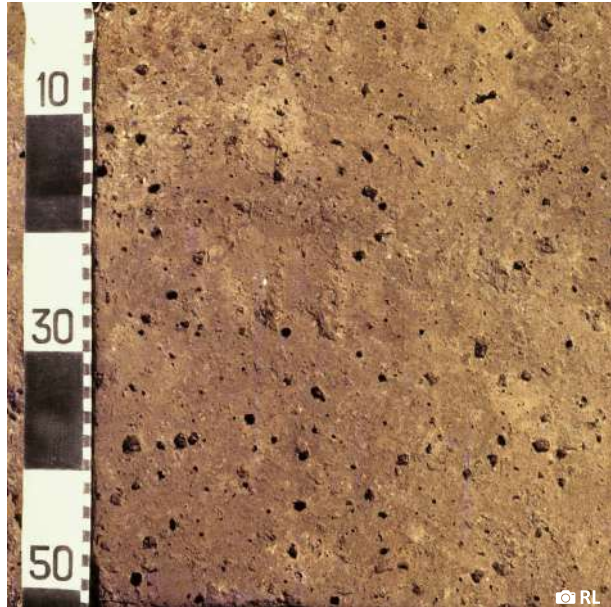


Fig. D150: Horizontaal vlak op 50 cm diepte. Er zijn ongeveer 800 tot 1000 verticale wormgaten per vierkante meter zichtbaar.



Fig. D151-D152: Horizontaal vlak op 55 cm diepte vanaf het oppervlak in een zandleembodem op een oude landbouwakker. De nagels zitten in open regenwormgalerijen, de lucifers zitten in de regenwormgangen die gevuld zijn en de stenen tonen de sporen van mollengangen. Kerkhove, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Omar, 1985).





Fig. D153: Landschap van het Zoniënwoud op voornamelijk leembodems. Zoniënwoud, Brussel, België.

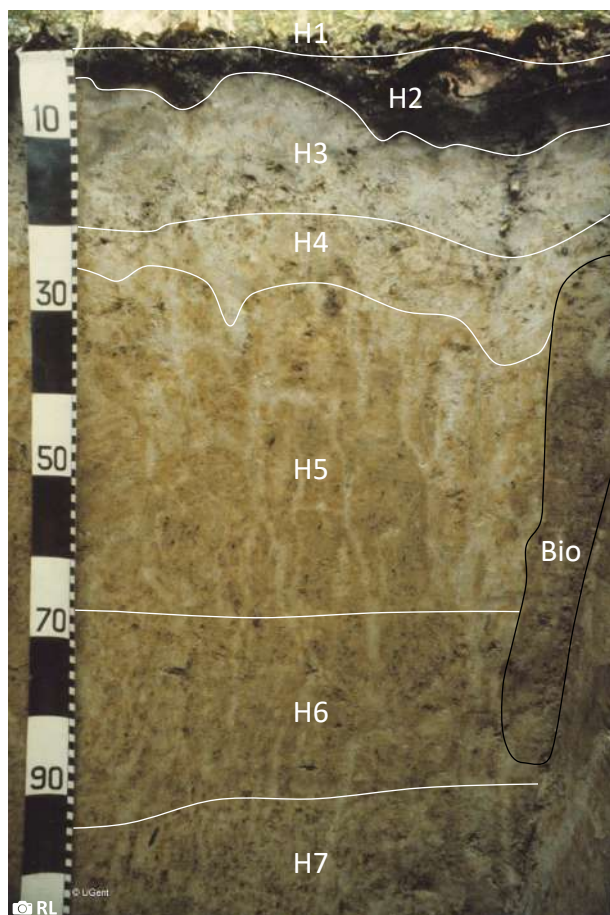
Fig. D154: Typische leembodem in het Zoniënwoud (Abc). Vanaf 30 cm diepte is er een donkerbruine compacte kleiaanrij-kingshorizont met verticale bleke tongen die een polygonaal patroon volgen. De wortels kunnen slechts langs deze tongen dieper in de bodem dringen. Hierdoor is het bodemvolu-me voor beworteling tussen 30 en 120 cm zeer beperkt. De fysieke fertiliteit is dus zeer laag. Bovendien is deze bodem zeer zuur en nutriëntenarm tot 100 cm diepte. De chemische fertiliteit voor de kruidenvegetatie, waarvan de wortels in de bovenste decimeters groeien, is dus eveneens zeer laag. Dit was het oorspronkelijke bodemtype aanwezig in de Belgische leemstreek op het ogenblik dat de eerste landbouwers deze streek koloniseerden. Zoniënwoud, Brussel, België. (Langohr, 2001; Langohr & Sanders, 1985).



Fig. D155: Horizontaal vlak op 40 cm diepte van eenzelfde type bodem als in fig. D154. Geen sporen van regenwormgangen. De verticale bleke tongen zijn sporen van oude krimpscheuren. De wortels groeien alleen door deze tongen. De rest van de horizon is te compact voor wortelpenetratie. Dit is dus een bodem met lage fysieke fertiliteit. Deze horizon noemt men een 'fragipan'. Zoniënwoud, Brussel, België.



Fig. D156: Een hydromorfe leembodem onder bosbestand. Zoniënwood, Brussel, België.



H1: +2-0 cm: O; strooisellaag.

H2: 0-3/11 cm: Ah; humusrijke oppervlakte horizont.

H3-H4: 3/11-25/37 cm: E1/E2; licht gekleurde ijzer- en klei-uitlogingshorizont.

H5-H7: 25/37-110+ cm: Btx; klei-aanrijkingshorizont en fragipan.

Fig. D157: Een hydromorfe leembodem (Adc) onder bosbestand dat nooit gerooid is geweest.

De humusrijke oppervlaktehorizont is slechts enkele centimeter dik. Dit wijst op de afwezigheid van graafactiviteiten van regenwormen en mollen.

In de winter komt de grondwatertafel tot aan het bodemoppervlak, in de zomer is de grondwatertafel diep weggezakt (niet te zien op de foto). Zoniënwood, Brussel, België.

Darwin, regenwormen en archeologische structuren

In een hoofdstuk over bioturbatie door regenwormen kan een verwijzing naar het onderzoek van Charles Darwin niet ontbreken. Gedurende meer dan 40 jaar maakte deze briljante natuuronderzoeker observaties en deed hij talrijke experimenten over het gedrag van regenwormen. Het grootste deel van dit onderzoek is beschreven in zijn laatste boek *'The formation of vegetable mould through the action of worms, with observations on their habits'* (Darwin, 1881) dat over de vorming van humus door regenwormen gaat.

De publicatie behandelt niet alleen de fysiologie en ethologie van regenwormen, maar ook bodemkunde, landbouw, geologie en archeologie. Het boek had een verkoopsucces dat vergelijkbaar was met dat van *'On the origin of species'* (Darwin, 1859). De publicaties van Feller *et al.* (2000, 2003) en Blanchart *et al.* (2005) geven een uitstekende samenvatting van dit werk. Op het vlak van archeologie vermeldt Darwin dat in 15 jaar tijd een bodemoppervlak met artefacten begraven wordt onder ongeveer 6 cm teelaarde. Darwin verwijst naar humus, een 'plantaardige vorm' ('vegetable mould'). Deze nieuwe bodemhorizont wordt effectief door veel wortels doorkruist, maar de term *'dierenbodem'* zou misschien geschikter zijn, omdat deze horizont voornamelijk bestaat uit een opeenhoping van anekische wormexcrementen. Darwin concludeerde dat regenwormen elk object, dat niet onderhevig is aan ontbinding en aan het bodemoppervlak ligt, mettertijd zullen begraven. Zo'n object zal dus door de wormenactiviteit in de bodem voor onbepaalde tijd beschermd en bewaard blijven. Darwin concludeert dat archeologen de regenwormen hiervoor dankbaar moeten zijn! Hij is verder van mening dat andere gravende dieren, zoals mieren, een vergelijkbare impact kunnen hebben.

Dit proces wordt door R. Langohr het 'Darwin' effect genoemd (figuren D158-D165).



Fig. D158: Een concentratie van graafactiviteiten van wormen, insecten en muizen onder de boomstam doet het bodemoppervlak geleidelijk 'zakken'. Dit proces wordt nog versterkt door de graafactiviteit van predatoren zoals mollen, muizen en fretten. Busteni, Roemenië.



Fig. D159-D160: De bioturbatie door voornamelijk regenwormen en mieren die aarde naar boven brengen, heeft een opervlaktehorizont zonder stenen gevormd. Perche, Frankrijk.

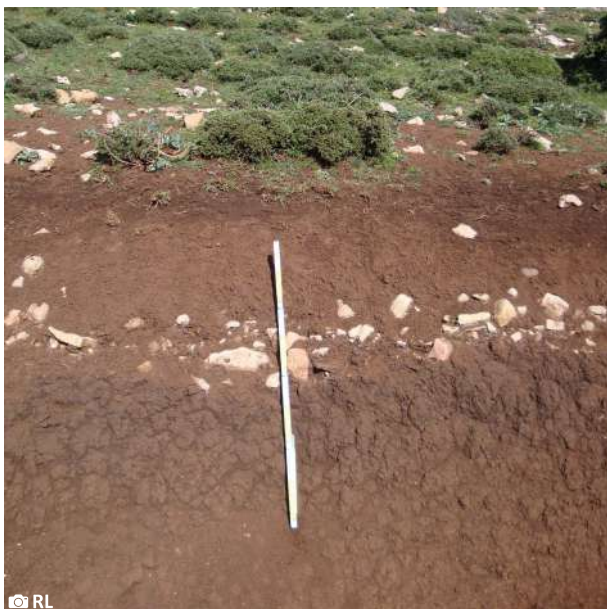


Fig. D161: Door bioturbatie dalen geleidelijk de stenen tot aan de ondergrens van de biologisch actieve horizon. Door dit proces kunnen artefacten naar beneden in de bodem zakken. Atlas, Marocco.



Fig. D162: Termietenactiviteit heeft de stenige bodem bedekt met een 20 cm dikke steenvrije horizon. Dschang, Kameroen.

Invloed van het (bodem)klimaat op de graafdiepte van mollen en regenwormen: een vergelijking tussen leembodems van de Belgische leemstreek en deze van de Parijse regio.

De leemstreek van België ontvangt een gemiddelde jaarlijkse regenneerslag van ongeveer 820 mm met een neerslagoverschot in de winter. Hierdoor loogt de kalk uit en is de löss ontkalkt tot 2 à 3 m diepte. De regenwormen (*Lumbricus terrestris*) nestelen zich in de zomer op een diepte van 80 tot 120 cm, waar ze een omgeving vinden die voldoende vochtig is om te overleven. Dit toont aan dat de bodem in de zomer net tot boven deze diepte uitdroogt. Tot hier zijn er ook sporen van mollen zichtbaar en is de bodem gekenmerkt door een prismastructuur ontwikkeld door uitdroging. Parijs ontvangt een jaarlijkse neerslag van gemiddeld 640 mm wat ongeveer evenveel is als de jaarlijkse gemiddelde evapotranspiratie. Er is dus geen overschot tussen neerslag en evapotranspiratie. De uitlozing is hier beperkt zodat de leembodems van Parijs nog kalk bevatten tot aan het oppervlak (Pieters, 1991, 1993, 1994, 1998). De bodems drogen dus dieper uit en de regenwormgangen gaan hier tot 180-200 cm, wat ook de diepte is tot waar de mollengangen reiken (figuur D4).

De diepte tot waar men regenworm- en mollengangen terugvindt in de bodem, geven dus een indicatie voor het klimaat.

Mieren

Hoewel klein, en misschien daarom onderschat en verwaarloosd in archeologisch onderzoek, vormen **mieren** één van de belangrijkste actoren verantwoordelijk voor de bodembioturbatie.

In regio's met een gematigd klimaat nestelen deze insecten zich in de grond en jagen of oogsten ze hun voedsel bovengronds. Het nest bestaat uit talloze onregelmatige gangen van sterk verschillende afmetingen. In sommige gevallen bevindt het nest zich volledig ondergronds, waarbij de aarde van de gangen op het bodemoppervlak wordt afgezet en waar het zich kan ophopen of eroderen (figuren D163-D165).

De mieren hebben hierbij een sterke invloed op de ontwikkeling van een goede kruimelstructuur in de oppervlakkige bodemhorizont (figuren D166, D167).

In andere gevallen bevindt het nest zich gedeeltelijk ondergronds en gedeeltelijk aan de oppervlakte in de vorm van een koepel die vooral uit aarde bestaat ('minerale koepel') (figuren D166-D176).

Een derde nestvorm bestaat uit organisch afval zoals fragmenten van bladeren, naalden en twijgjes vermengd met de minerale fractie afkomstig van de ondergrondse gangen. Deze nestvorm wordt ook omschreven als een 'organische koepel' (figuren D177-D183). De grote mierenhopen in naaldbossen zijn daarom slechts gedeeltelijk opgebouwd uit naalden (figuren D180-D183). Het gangenstelsel van het nest functioneert als een airconditioningsysteem om tot optimale omstandigheden te komen voor de incubatie van de eieren (figuur D178).

Mieren zijn grotendeels afwezig op akkers en intensief begraasde weiden, omdat de nesten daar te vaak worden verstoord. Ze komen frequent voor onder afsluitingen en hagen die de landbouwpercelen scheiden (figuren D170-D172), in extensief begraasde graslanden (figuren D173-D176) en in bossen en wouden (figuren D178-D183). Ze komen zelfs voor op veenbulten in moerassen en venen.

Door het onregelmatig verloop van de talrijke gangen, kan de uitgegraven aarde niet terugvallen in deze structuren. Zolang de dieren aanwezig zijn, wordt het geheel goed onderhouden, maar als het nest wordt verlaten, zal dit geleidelijk instorten waardoor er een microreliëf kan ontstaan (figuur D184).

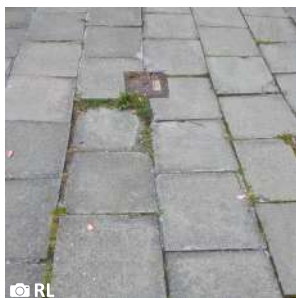


Fig. D163-D165: Mieren brengen aarde van de ondergrondse gangen naar het oppervlak. Bij wind of regen kan deze aarde wegwaaien of wegspoelen. Na een tijd zullen de straatstenen wegzakken en wordt het wegdek oneffen. Wanneer de aarde aan het oppervlak blijft liggen, zeker als er vegetatie begint te groeien, zullen de stenen volledig verdwijnen onder een nieuwe bodemhorizont. Sint-Pieters-Woluwe, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België.



Fig. D166: Doorsnede van een minerale mierenkoepel met talrijke gangen en kamers. Balaton, Hongarije.



Fig. D167: Mieren produceren een goed ontwikkelde kruimelstructuur.



Fig. D168-D169: Gangen van een verlaten mierennest in een lemige zandbodem op een weide die extensief begraasd wordt door schapen. Maldegem-Vliegplein, Maldegem, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. D170: Minerale koepelnesten van mieren, tot 60 cm hoog. De kleur van de aarde wijst op de bodemhorizont waarin de gangen zich bevinden. Slovakije.

Fig. D171-D172: Typische concentratie van minerale mierenkoepels ter hoogte van een perceelsgrens waar betreding door het vee beperkt is. Solvay Park, Watermaal-Bosvoorde, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België.



Fig. D173: Talrijke minerale mierenkoepels in een extensief begraasde weide. Sibiu Paltinis gebergte, Roemenië.



Fig. D174: Zelfde site als figuur D173, doorsnede van een mierenest waarop de zone van de bodem die gebioturbeerd is, goed te zien is.



Fig. D175: Hoge dichtheid van minerale koepelnesten van mieren in een extensief begraasde weide. Baskenland, Frankrijk.



Fig. D176: Hoge dichtheid van minerale koepelnesten van mieren in een extensief begraasde weide. Waardamme, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. D177: Organische koepel van een mierenest. Deze micro-heuvel bestaat uit organische fragmenten zoals dennennaalden, bladeren en twijgjes vermengd met een minerale fractie afkomstig van de ondergrondse gangen en kamers. Dikwijls verkiezen de mieren hun nest aan te leggen tegen een dode boomstronk wat het graven van gangen vergemakkelijkt. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.



Fig. D178: Organische koepel. De asymmetrische constructie verhoogt de impact van de zonnestralen, belangrijk voor de incubatietemperatuur van de eieren. Ös lake, Noorwegen.



Fig. D179: Er bestaat veel variatie in de morfologie van organische koepels. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.



Fig. D180-D183: Twee topotransecten van organische koepels. De minerale fractie afkomstig van de ondergrondse gangen heeft de neiging om naar beneden te rollen. Boven: Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje; Onder: Itterswiller, Frankrijk.

Fig. D184: Microreliëf na het instorten van een verlaten mierrennest. De hogere rand rond de depressie is te wijten aan de minerale fractie die naar beneden is gerold. Alstrug Forest, Jutland, Denemarken.



Organische koepelnesten van mieren en bosbranden of 'haardkuilen': mier of mens?

In de afgelopen decennia zijn meer dan 2.500 kleine en ondiepe kuilen die houtskool bevatten, opgegraven op mesolitische vindplaatsen in de zandige laaglanden van België, Nederland en Noord-Duitsland (figuren D185-D188).

De meeste van de opgegraven structuren bevatten niets meer dan houtskoolfragmenten en houtskoolpoeder vermengd met zand, waardoor hun functie onduidelijk blijft. Een frequent aangehaalde uitleg is dat ze van antropogene oorsprong zijn en ze worden dan ook omschreven als haardkuilen. De interpretaties variëren van het branden van hazelnoten, kookkuilen voor het drogen, het braden of roken van vlees of plantaardig voedsel, het drogen of roken van huiden, verwarmingsputten van vuursteen of productieputten voor hars, teer of houtskool (Niekus, 2011; Huisman *et al.*, 2019). Bij gebrek aan direct bewijs overtuigen deze interpretaties onvoldoende. Een recente kritische beoordeling van de

beschikbare gegevens en meer specifiek een reeks bodemkundige argumenten (figuren D185-D190), suggereert echter een mogelijke natuurlijke oorsprong (Crombé *et al.*, 2015, 2016; Langohr *et al.*, 2015; Crombé & Langohr, 2020a, b). Volgens Crombé & Langohr kunnen de 'haardkuilen' overblijfselen zijn van organische mierennesten, die verbrand zijn tijdens bosbranden in de loop van het mesolithicum.

Belangrijke argumenten voor deze hypothese komen uit de bodemkunde dankzij opgravingen die dieper en breder gaan dan louter de zwarte aarde van de structuur (figuren D186, D187). Deze prospectiemethode toont aan dat de bodem onder de zwarte structuur tot meerdere decimeters diep verstoord is met kenmerken, zoals het verzakken van kleimigratiebanden, die niet kunnen verklaard worden door een graafactiviteit van de mens maar wel door het instorten van talrijke gangen van een mierennest evenals door het vergaan van boomwortels.



Fig. D185: Opgraving op de site van het Deurganckdok te Doel. De polderklei, de veenlaag en ongeveer 30 cm van de onderliggende minerale bodem zijn verwijderd. Talrijke cirkelvormige sporen van zwarte aarde werden toegeschreven aan 'haardkuilen'. Dit zijn echter resten van verbrande organische koepelnesten van mieren (zie verder fig. D186-D188). Doel, provincie Antwerpen, België.



Fig. D186-D188: Drie voorbeelden van zwarte circulaire sporen bestaande uit een komvormig spoor gevuld met zand en vermengd met houtskoolpoeder en enkele houtskoolfragmenten. Ter hoogte van deze structuren zijn de kleimigratiebanden, die normaal gezien parallel met het bodemoppervlak liggen, door de bouw van mieren nest naar beneden gezakt. Het geheel pleit voor de hypothese van verbrande mieren nesten met een organische koepel. Opgraving aan het Deurganckdok, Doel, provincie Antwerpen, België. (Crombé *et al.*, 2015).



Fig. D187: Structuur van een verbrand mieren nest. Het komvormig zwart spoor bestaat uit zand vermengd met houtskoolpoeder. De ondergrens van de structuur toont geen sporen van mestkevers.



Fig. D188: Gelijkaardig spoor als D185 en D186 maar hier zijn er talrijke circulaire sporen van mestkevergangen aan de onderzijde van het komvormig spoor te zien. In deze zone is er nadien veeteelt geweest. (Deforce *et al.*, 2013).



Fig. D189-D190: Twee voorbeelden van verstoringen van kleimigratiebanden, hoogst waarschijnlijk te wijten aan mieren nesten, hier zonder brandsporen. Deurganckdok, Doel, provincie Antwerpen, België.

Bodembioturbatie door gravende dieren onder takken, boomstammen en stenen

De bodem onder takken, boomstammen en stenen die op de grond liggen, biedt een bijzonder milieu voor bodemfauna. Zo'n site levert bescherming tegen predatoren zoals vogels en blijft lang vochtig in perioden van droogte dankzij de tragere verdamping.

Regenwormen, larven van insecten die op dood hout leven, kevers, mieren en vele andere insecten trekken op hun beurt predatoren aan zoals mollen, spitsmuizen, bosmuizen. Dit vormt een biotoop gekenmerkt door de aanwezigheid van talrijke gangen onder een tak, stam of steen. De aarde van deze gangen wordt zijdelings van het hout afgezet. Zo kan de tak of stam geleidelijk aan in de bodem zakken (zie kader Darwin, regenwormen...) (figuur D158).

Samenvatting van de biotopen en de potentiële graad van bioturbatie door gravende dieren

Tabel D1 geeft voor West-Europa een inschatting van de graad van mogelijke bioturbatie door gravende dieren. Er is een onderscheid gemaakt naargelang het bodemgebruik en op voorwaarde dat de andere ecologische factoren zoals klimaat, grondwaterstand en bodemtextuur gunstig zijn voor de aanwezigheid van bodemfauna (gebaseerd op de ervaring van R. Langohr).

Bodemgebruik	Dassen, konijnen op helling	Mollen	Regenwormen - anekisch	Mestkevers	Mieren
Bos op zure grond, arm aan stikstof, niet begraasd	++	(+)	(+)	+/-	++
Bos op zure grond, rijk aan stikstof, niet begraasd	++	++	++	+/-	++
Bos op kalkhoudende bodem, niet begraasd	++	++	+++	+/-	++
Gemaaid grasland, op zure bodem	+/-	(+)	+	(+)	(+)
Gemaaid grasland, op kalkhoudende bodem	+/-	++	+++	(+)	(+)
Weide intensief begraasd, op zure of kalkhoudende bodem	(+)	+++	+++	+++	(+)
Extensief begraasde weide, op zure bodem	+/-	+	+	++/-	+++
Extensief begraasde weide, op kalkhoudende bodem	+/-	++	++	++/-	+++
Akker	(+)	+	++	(+)	(+)
Legende: +/-: soms wel, soms niet, afhankelijk van andere milieufactoren, (+): zeer zelden, +: soms, ++: veelvuldig, +++: frequent.					

Tabel D1: Graad van mogelijke bioturbatie door gravende dieren naargelang het bodemgebruik. (Bron: R. Langohr).

REFERENTIES

- Antrop, M., Belayew, D., Droeven, E., Feltz, C., Kummert, M. & Van Eetvelde, V., 2004. Landscape research in Belgium. *Belgian Journal of Geography*, 2004, 2-3, 209-222.
- Armour-Chelu, M. & Andrews, P., 1994. Some effects of bioturbation by earthworms (*Oligochaeta*) on archaeological sites. *Journal of Archaeological Science*, 21, 433-443.
- Balek, C., 2002. Buried artifacts in stable upland sites and the role of bioturbation: a review. *Geoarchaeology*, 17, 41-51.
- Bats, M., Crombé, Ph., Devriendt, I., Langohr, R., Mikkelsen, J., Ryssaert, C., Schreurs, J., Van De Water, A. & Van Strydonck, M., 2004. Onderzoek langs de omleiding N273 te Haelen (Provincie Limburg, Nederland): Vroeg-Mesolithicum en Vroeg-Neolithicum. *Notae Praehistoricae*, 22, 87-102.
- Bertran, P., Todisco, D., Bordes, J.-G., Discamps, E. & Vallin, L., 2019. Perturbation assessment in archaeological sites as part of the taphonomic study: a review of methods used to document the impact of natural processes on site formation and archaeological interpretations. *Paleo*, 30, 1, 52-75.
- Blanchart, E., Brown, G., Chernyanskii, S., Deleporte, P., Feller, C., & Goulet, F., 2005. Perception et popularité des vers de terre avant et après Darwin. *Etude et Gestion des Sols*, 12, 2, 145-152.
- Botbol, R., 1973. Cartographie des sols de la partie sud-ouest de la commune de Surice (Belgique). Bodemkartering van het zuidwestelijk deel van de gemeente Surice (België). Niet gepubliceerde M.Sc. thesis, Rijksuniversiteit Gent, 56 pp.
- Bouché, M., 2014. *Des vers de terre et des hommes*. Actes Sud, 322 pp.
- Bourgeois, J., 1990. Nécropoles et "sanctuaires" de La Tène en Flandre. In: *Les Celtes en France du Nord et de Belgique, VI^e – 1^{er} Siècle avant J.-C.*, (ed. Leman- Delerive, G.), 117-119. Crédit communal, Bruxelles, 280 pp.
- Bourgeois, J. & Rommelaere, J., 1991. Bijdrage tot de kennis van het Meetjesland in de Metaaltijden. De opgravingen te Ursel (1985-1989) en Aalter (1989-1990). In: *Appeltjes van het Meetjesland. Jaarboek van het Heemkundig Genootschap Meetjesland*, 42, 59-88.
- Brett, R. & Fagerstrom, J., 1980. Invertebrate levensspuren of Holocene floodplains: their morphology, origin and paleoecological significance. *Journal of Paleontology*, 54, 641-630.
- Brussaard, L., 1986. Effecten van mestkevers op de bodemstructuur. *Vakblad voor Biologie*, 66, 4, 78-81.
- Brussaard, L. & Runia, T., 1984. Recent and ancient traces of scarab beetle activity in sandy soils of the Netherlands. *Geoderma*, 34, 3-4, 229-250.
- Bubel, S., 2003. Detecting the Effects of Faunaturbation: a close look at the prehistoric sites of Meeuwen, Meer 6 and Brecht-Moordenaarsven 2. *Notae Praehistoricae*, 23, 39-44.
- Cabard, P., 2009. *Le castor*. Delachaux et Niestlé, 192 pp.
- Canti, M., 2003. Earthworm activity and archaeological stratigraphy: a review of products and processes. *Journal of Archaeological Science*, 30, 135-148.
- Canti, M., 2005. Wondering about worms: stones, soil and stratigraphy. In: *Fertile Ground* (eds. Smith, D., Brickley, M. & Smith, W.), 30-42. Papers in honour of Susan Limbrey. Symposia of the Association for Environmental Archaeology. Oxbow Books, 166 pp.
- Christiaens, B. & Verwaerde, J., 1998. *Verspreiding van de hamster (Cricetus cricetus) in Vlaanderen*. De Wielewaal Natuurvereniging v.z.w., AMINAL, afdeling Natuur.
- Conard, N., Preuss, J., Langohr, R., Haesaerts, P., Van Kolfschoten, Th., Becze-Deák, J. & Rebholz, A., 1995. New geological research at the middle Paleolithic locality of Wallertheim in Rheinhessen. *Archäologisches Korrespondenzblatt*, 25, 1-27.
- Conard, N., Haesaerts, P. & Langohr, R., 1996. Quaternary Geology and Palaeolithic Archaeology in Wallertheim in Rheinhessen. *Frankfurter geowiss. Arbeiten* D, 20: 131-141.
- Conings, P., 1989. Studie van het familiaal en territoriaal leven van de das (*Meles meles* L.) met het oog op een efficiënt beheer van de restpopulaties. Niet gepubliceerde licentiaatsthesis, Rijksuniversiteit Gent, 79 pp.
- Criel, D., 1997. *De das in Vlaanderen, een verhaal in zwart en wit*. Uitg. Marc de Wiele, Brugge, 121 pp.
- Crombé, Ph., 1993. Tree-fall features on Final Paleolithic and Mesolithic sites situated on sandy soils: how to deal with it. *Helinium*, 33, 1, 50-66.
- Crombé, Ph., 1996. Epipaleolithicum en Vroeg- en Midden-Mesolithicum in zandig Vlaanderen: bijdrage tot de studie van de typo-chronologie en de nederzittingsstructuur. Onuitgegeven doctoraatscriptie, Rijksuniversiteit Gent, 3 vol.
- Crombé, Ph., Langohr, R. & Louwagie, G., 2015. Mesolithic hearth-pits: fact or fantasy? A reassessment based on the evidence from the sites of Doel and Verrebroek (Belgium). *Journal of Archaeological Science*, 61, 158-171.
- Crombé, Ph., Langohr, R. & Louwagie, G., 2016. Over houtskool, mieren en bosbranden tijdens het Mesolithicum. *Ex Situ*, 12, *Tijdschrift voor Vlaamse archeologie*, 2, 44-46.
- Crombé, Ph. & Langohr, R., 2020a. On the origin of Mesolithic charcoal-rich pits: A comment on Huisman *et al.* *Journal of Archaeological Science*, 119, 6 pp.

- Crombé, Ph. & Langohr, R., 2020b. Mesolithic charcoal-rich pits: 'pit hearts' or 'ant nests'. A short response to Huisman *et al.* (2020). *Notae Prehistoricae*, 40, 51-60.
- Darwin, Ch., 1859. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. London, John Murray, Albemarle Street, 502 pp.
- Darwin, Ch., 1881. *The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observations on their habits*. John Murray, London, 160 pp.
- De But, A., *Raparium*. Koninklijke Bibliotheek van België, Brussel, Ms 7978-79, f. 5r.
- Deforce, K., Bastiaens, J., Van Neer, W., Ervynck, A., Lentacker, A., Sergeant, J. & Crombé, Ph., 2013. Wood charcoal and seeds as indicators for animal husbandry in a wetland site during the late Mesolithic – early Neolithic transition period (Swifterbant culture, ca. 4600–4000 B.C.) in NW Belgium. *Vegetation and Historical Archaeology*, 22, 51-60.
- Do Linh San, E., 2006. *Le blaireau d'Eurasie*. Delachaux et Niestlé, 224 pp.
- Dondeyne, S. & Deckers, J., 2019. Abc soil types, Podzoluvisols, Albeluvisols or Retisols? A review. In: *Soils as records of past and Present. From soil surveys to archaeological sites: research strategies for interpreting soil characteristics* (eds. Deák, J., Ampe, C. & Mikkelsen, J.), 55-64. Proceedings of the Geoarchaeological Meeting Bruges (Belgium), 6 & 7 November 2019. Raakvlak, Bruges, 319 pp.
- Driscoll, K., Alcaina, J., Égüez, N., Mangado, X., Fullola, J. & Tejero, J.-M., 2016. Trampled under foot: A quartz and chert human trampling experiment at the Cova del Parco rock shelter, Spain. *Quaternary International*, 424, 130-142.
- Dupouey, J.-L., Sciamia, D., Laffite, J.-D., Georges-Leroy, M. & Dambrine, E., 2007. Impact des usages agricoles antiques sur la végétation en forêt de Saint-Amond: interaction avec le traitement sylvicole actuel. In: *La mémoire des forêts* (eds. Dupouey, J.-L., Dambrine, E., Dardignac, C. & Georges-Leroy, M.), 181-189. Actes du colloque "Forêt, Archéologie et Environnement", 14-16 décembre 2004. ONF, INRA, Direction régionale des affaires culturelles de Lorraine, 295 pp.
- Dunwell, A. & Trout, R., 1999. Burrowing animals and archaeology. Historic Scotland- Ancient monuments division: Technical Advice Note, 16, pp 13.
- Dwyer, G., Dushoff, J. & Yee, S., 2004. The combined effects of pathogens and predators on insect outbreaks. *Nature*, 430, 341-345.
- Ervynck, A., 2009. Carabid beetles as ecological indicators in Belgian archaeology: the pioneering work of Konjev Desender. *Entomologie*, 79, 35-44.
- Fechner, K., Blancquaert, G. & Langohr, R., 2004. L'utilité de l'archéopédologie: l'exemple du site du Marais de Dourges (Pas-de-Calais). *Archéopages*, 12, 10-13.
- Feller, C., Brown, G. & Blanchard, E., 2000. Darwin et le biofonctionnement du sol. *Etude et Gestion des Sols*, 7, 395-402.
- Feller, C., Brown, G., Blanchard E., Deleporte, P. & Che-myanskii, S., 2003. Darwin, earthworms and the natural sciences: various lessons from past to future. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 99, 29-49.
- Gebhardt, A. & Langohr, R., 1999. Micromorphological studies of construction materials and living floors in the medieval motte of Werken (West-Flanders, Belgium). *Geoarchaeology*, 14, 595-620.
- Georges-Leroy, M., Bock, J., Dambrine, E., Dupouey, J.-L. & Laffite, J.-D., 2014. Parcelles et habitat antiques des forêts du plateau de Haye en Lorraine : bilan et perspectives. *Les parcelles conservés sous forêt*, May 2014, Paris, France, 1-27.
- Gobat, J.-M., Arango, M. & Mathhey, W., 2010. *Le sol vivant. Bases de pédologie – Biologie des sols*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 817 pp.
- Haesaerts, P., Langohr, R. & Conard, N., 1997. Geology, paleoenvironments and the stratigraphic position of the Wallertheim horizons. In: Reports of the second Wallertheim workshop (eds. Conard, N., & Kandel, A.), 46-51. Tübingen, March 1997.
- Hoeksema, K., 1953. De natuurlijke homogenisatie van het bodemprofiel in Nederland. *Boor en Spade*, VI, 24-30.
- Hoeksema, K. & Edelman, C., 1960. The role of biological homogenization in the formation of Gray-Brown Podzolic soils. In: Transactions 7th International Congress Soil Science, Madison, Wisconsin, U.S.A., 4, 402-405.
- Huisman, D., Niekus, M., Peeters, J., Geerts, R. & Müller, A., 2019. Deciphering the complexity of a 'simple' Mesolithic phenomenon: Indicators for construction, use and taphonomy of pit hearths in Kampen (the Netherlands). *Journal of Archaeological Science*, 109, 1-12.
- Jeske, R. & Kuznar, L., 2001. Canine digging behaviour and archaeological implications. *Journal of Field Archaeology*, 28, 3/4, 383-394.
- Johnson, D. & Watson-Stegner, D., 1990. The soil-evolution model as a framework for evaluating pedoturbation in archaeological site formation. In: *Archaeological Geology of North America*, (eds. Lasca, N. & Donahue, J.), 541-558. Geological Society of America Centennial Special Volume 4. Geological Society of America, Boulder, CO, 633 pp.
- Johnson, D., 2002. Darwin would be proud: bioturbation, dynamic denudation, and the power of theory in science. *Geoarchaeology*, 17, 7-40.

- Jula, M. & Voiculescu, M., 2022. Assessment of the mean erosion rate using dendrogeomorphological approaches on exposed roots along hiking and biking trails in the Bucegi Mountains, Romanian Carpathians. *Catena*, 217. <https://doi.org/10.1016>.
- Klijn, J., 1981. Nederlandse kustduinen, geomorfologie en bodems. Proefschrift Ph.D., Landbouwhogeschool Wageningen, 188 pp.
- Langohr, R., 2001. L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien – Apports de l'archéopédologie. *Étude et Gestion des sols*, 8-2, 103-118.
- Langohr, R., 2004. Maldegem-Vake. Selection of Contributions from Soil Science. In: *Archaeology in confrontation: aspects of Roman military presence in the North-west*. Studies in honour of Prof. Em. Hugo Thoen, (eds. Vermeulen, F. & Sas, K. & Dhaze, W.), 181-190. Archaeological Reports Ghent University 2, 459 pp.
- Langohr, R., Crombé, Ph. & Louwagie, G., 2015. Over archeologie, bodems en mieren. *Forum Formicidarum*, 16, 2, 14-18.
- Langohr, R. & Sanders, J., 1985. Etude pédologique du site de Darion: données préliminaires. *Bulletin de la Société Royale belge d'Anthropologie et de Préhistoire*, 96, 17-30.
- Lauwerier, R. & Zeiler, J., 2001. Wishful thinking and the introduction of the rabbit in the Low Countries. *Environmental Archaeology*, 6, 87-90.
- Lenaerts, X., 2015. Dassen mogen in grafheuvel blijven. Dieren vormen geen bedreiging voor Romeinse tumulus van 1800 jaar oud. Het Laatste Nieuws, 15.10.2015. <https://www.hln.be/tongeren/dassen-mogen-in-grafheuvel-blijven~ac65abdd/>
- Mallye, J.-B., 2007. Les restes de blaireaux en contexte archéologique : taphonomie, archéozoologie et éléments de discussion des séquences préhistoriques. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1 N° d'ordre 3378, 527 pp.
- Meganck, M. & Fockede, L., 1995. Het bronstijdgrafveld "Drie Koningen" te Oedelem (W.-VI.). *Lunula, Archaeologia Protohistorica*, III, 50-52.
- Mikkelsen, J., Langohr, R., Boas, N., & Macphail, R., 2006. Land Use and Environmental Degradation in Bronze Age Settlements, Eastern Jutland, Denmark. In: *Archaeology and Environment 21*. Proceedings from the VIII Nordic Conference on the Applications of Scientific Methods in Archaeology in Umeå 2001 (eds. Engelmark, R. & Linderholm, J.), 81-92. Umeå, Sweden, 146 pp.
- Mikkelsen, J., Langohr, R. & Macphail, R., 2007. Soilscape and Land-Use Evolution Related to Drift Sand Movements Since the Bronze Age in Eastern Jutland, Denmark. *Geoarchaeology*, 22, 2, 157-181.
- Mougenot, C. & Strivay, L., 2011. *Le pire ami de l'homme. Du lapin de garenne aux guerres biologiques*. Les empêcheurs de penser en rond / La découverte, 170 pp.
- Niekus, M., 2011. Ruimtelijke configuraties van mesolithische haardkuilen in Noord-Nederland. *Paleo-Aktueel*, 22, 16-23.
- Ohel, M., 1987. More on the effects of burrowing animals on archaeological site formation. *American Antiquity*, 52, 4, 856-857.
- Omar, M., 1985. Study and survey of particular soil characteristics in relation to the archaeological site of Kerkhove, north-western limit of the Belgian loess belt. Studie en kartering van bijzondere bodemkenmerken in verband met de archeologische site van Kerkhove, noord-westelijke grens van het Belgische lössgebied. Niet gepubliceerde M.Sc. thesis, Rijksuniversiteit Gent, 59 pp.
- Pieters, M., 1986. Ontwikkeling en toepassing van bodemprospectietechnieken voor archeologische sites van de Belgische Zand- en leemstreek. M.Sc. thesis, Rijksuniversiteit Gent, 139 pp.
- Pieters, M., 1991. Les faciès limoneux des Jardins du Carrousel à Paris: étude pédo-sédimentaire. In: *Les Jardins du Carrousel à Paris. Fouilles 1989-1990*, II, Le rapport de l'équipe (eds. Brunet-Vilatte, F., Cargnelli, C., Charniot, C.-P., Ciezar, P., Coste, M.-C., Deyber-Persignat, D., Gitta, C., Gonzalez, V., Lantada-Zarzosa, M., Lenhardt, P., Marcille, C., Monnet, C., Navech, A., Pieters, M., Ravoire, F., Rodet-Belarbi, I. & Van Ossel, P.), 27-78. Paris, 2 tomes, rapport inédit, 396 pp.
- Pieters, M., 1993. Apport de la pédologie à l'archéologie: le site des Jardins du Carrousel à Paris. *Mémoires du Groupement Archéologique de Seine-et-Marne*, 1, 41-53.
- Pieters, M., 1994. L'approche pédologique et paleo-environnementale. Grand Louvre. Sous les Jardins du Carrousel. *Les Dossiers de l'Archéologie*, 190, 10-15.
- Pieters, M., 1998. Le site ancien: pédologie et environnement. In: *Les Jardins du Carrousel (Paris). De la campagne à la ville: la formation d'un espace urbain*, (ed. Van Ossel, P.), 25-39. Editions de la maison des sciences de l'homme, 384 pp.
- Ponomarenko, D. & Ponomarenko, E., 2019. Describing crotonas: A contribution to methodology and interpretation. *Quaternary International*, 238-245.
- Rentzel, P., Nicosia, C., Gebhardt, A., Brönnimann, D., Pümpin, C. & Ismail-Meyer, K., 2017. Trampling, poaching and the effect of traffic. In: *Archaeological soil and sediment micromorphology*, (eds. Nicosia, C. & Stoops, G.), 281-297. Hoboken: Wiley Blackwell, 476 pp.
- Schwartz, D. & Gebhardt, A., 2011. L'enfouissement de vestiges archéologiques par la bioturbation: la colline du Hexenberg (Leutenheim, 67) – un cas d'école. *Etude et Gestion des Sols*, 18, 287-300.

338 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

Schaetzl, R. & Thompson, M., 2015. *Soils, Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, 778 pp.

Schelfhout, S., De Schrijver, A., Van Nevel, L., Vesterdal, L., Mertens, J., & Verheyen, K., 2014. Boomsoorten, bodemvruchtbaarheid en regenwormen: een intrigerend netwerk van interacties. *Bosrevue*, 48c, 11-15.

Sevenants, W., Devroe, A., Langohr, R., Mikkelsen, J. & Vannieuwenhuyze, B., 2010. Archeologische evaluatie en waardering van de site Keizersberg (Leuven, provincie Vlaams-Brabant). Niet gepubliceerd rapport Triharch, 7, 210 pp.

Smith, D., Nayyar, K., Schreve, D., Thomas, R. & Whitehouse, N., 2014. Can dung beetle from the palaeoecological and archaeological record indicate herd concentration and the identity of herbivores? *Quaternary International*, 341, 119-130.

Stein, J., 1983. Earthworm activity: a source of potential disturbance of archaeological sediments. *American Antiquity*, 48, 277-289.

Van Der Plaetsen, P., 1990. De das en zijn verleden. *Onze streek*, 3, 31-34.

Van de Vijver, M., Dalle, S., Sergeant, J., De Mulder, G., Langohr, R., Van Meirvenne, M., Ameloot, N., Simpson, D., Saey, T., Bourgeois, J. & Crombé, Ph., 2009. Evaluatie en waardering van de archeologische sites Rooiveld-Papevijvers, Oostkamp (West-Vlaanderen). Ugent Archeologische Rapporten 17, 160 pp.

Vermeersch, P. & Bubel, S., 1997. Postdepositional artefact scattering in a Podzol. Processes and consequences for Late Palaeolithic and Mesolithic sites. *Anthropologie*, 25, 2, 119-130.

Geraadpleegde websites op 10/09/2025

<https://www.hln.be/tongeren/dassen-mogen-in-graf-heuvel-blijven~ac65abdd/>

<https://www.natuurpunt.be/soorten/amfibieen-reptielen/rugstreepd>

IN DIALOOG MET BODEMS VELDBODEMKUNDE VOOR ARCHEOLOGISCH ONDERZOEK

BODEMBIOTURBATIE DOOR PLANTEN



AUTEURS : ROGER LANGOHR
CAROLE AMPE
JARI HINSCH MIKKELSEN

1. Stronken en wortels van bomen, sporen die verdwijnen

Hoewel planten niet veel bewegen, kunnen ze na verloop van tijd in belangrijke mate de bodem verstoren. Ze kunnen zowel verticale (op en neer) als laterale bewegingen van artefacten teweeg brengen evenals de archeologische structuren vernietigen.

Bodemonderzoekers kiezen ervoor om de bodem te onderzoeken in de zone van de zogezegde 'minimale verstoring'. Een put wordt nooit geopend dicht bij een boomstronk en ze blijven zo ver mogelijk van de levende of nog zichtbare dode stammen. In zo'n bodemput worden sporen van oude, vergane boomstronken zelden geobserveerd (figuren V1-V23). Dit is des te opmerkelijk omdat wanneer een site sinds het begin van het Holoceen bebost

is geweest, men kan inschatten dat op ongeveer 25 % van het bodemoppervlak, sporen van boomstronken moeten voorkomen (zie verder). Het feit dat er eveneens relatief weinig sporen van windworpen geobserveerd worden in de bodem, werd al opgemerkt door Troedsson en Lyford (1973). Dit wijst erop dat bioturbatieprocessen intens genoeg zijn om de sporen van talrijke oude stronken en wortels volledig te wissen. Aangezien tijdens het Holoceen de boomstronkstructuren grote volumes hebben ingenomen (figuren V9-V18), kunnen we aannemen dat er aanzienlijke bodembioturbatie is opgetreden waardoor artefacten vooral neerwaarts in de bodem zijn verplaatst.

Het vergaan van stronken en wortels van beuk in een leembodem - Zoniënwoud, België (figuren V1, V3-V6)



Fig. V1: Beukenwortels, na enkele tientallen jaren van biologische afbraak.

Fig. V2: Beukenwortels, na een afbraakperiode van 50 tot 100 jaar. Vooral het ondergrondse gedeelte is sterk vergaan. Le Châtelet, Lotharingen, provincie Luxemburg, België. ►



342 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



Fig. V3-V5: Boomwortels: na meerdere eeuwen afbraak is al het hout verteerd. De lichtere kleuren in de bodem zijn sporen van reductie. Water bleef stagneren op de door wortels samengedrukte bodem.



Fig. V6-V7: Na meerdere duizenden jaren blijven van de oorspronkelijke boomwortels en stronken geen sporen meer over. De bodem ziet eruit als een bodem zonder boomwortels en stronken, met een biologisch actieve horizont tot een 30-50 cm diepte. Fig. V7: Transinne, provincie Luxemburg, België.



Het verteren van een boomstronk verloopt in vier fasen:

Fase 1. Wanneer de boom sterft, zijn de wortelgangen helemaal gevuld met dood hout. De tijd die nodig is voor het volledig vergaan van het hout is afhankelijk van de boomsoort, de grootte van de stronk, de grootte van de wortels en het bodemtype. De volledige afbraak van de boomstronk duurt ongeveer even lang als de leeftijd van de boom. Het vermolmen en verdwijnen van de stronk van een eik, een houtsoort die een relatieve hoge dichtheid heeft, in de grootteorde van $600\text{--}1000\text{ kg/m}^3$, en daarenboven ook nog een hoog gehalte aan tannine (polyfenolen met antibacteriële werking) bevat, zal beduidend langer duren (figuur V8) dan wat bijvoorbeeld het geval is voor populier, een zacht hout met een dichtheid van $350\text{--}450\text{ kg/m}^3$ en met weinig tannine.

Fase 2. Geleidelijk aan ontbindt het dode hout, de wortelgangen zijn gedeeltelijk leeg, gedeeltelijk gevuld met humus.

Fase 3. Als gevolg van fauna-activiteit (wormen, kevers, mieren...) en haar predatoren (mollen, muizen...) zal de organische vulling van de gangen langzamerhand vermengd geraken met minerale grond afkomstig van de wanden en uit de hogere bodemhorizonten. Dit proces kan eeuwen blijven duren, ook als de sporen van de wortels of de stronk niet langer zichtbaar zijn.



Fig. V8: De boom was ongeveer 150 jaar oud wanneer hij gekapt werd in 1936. De foto dateert van 70 jaar na het kappen van de boom. Zo kan men inschatten dat er minstens evenveel tijd nodig is voor het vergaan van de boomstronk als voor de groei van de boom. Forêt domaniale de Saint-Michel, Thiérache, Noord-Frankrijk.

Fase 4. In de laatste fase gebeurt de totale afbraak van de organische stoffen door microbiologische activiteit en is er door bioturbatie een volledige homogenisering van de bodem. Deze fase kan enkele millennia lang duren. Het uiteindelijke resultaat is het volledig verdwijnen van de boomstronk en de wortels en het terugkeren naar een 'normaal' bodemprofiel zoals het was voordat de boom aanwezig was.

Deze dynamiek vindt voornamelijk plaats in de bovenste bodemhorizonten die we de 'biologisch actieve laag' noemen (de A- en B β -horizonten); meestal zijn ze tezamen 30 à 60 cm dik (figuur V5). In de diepere horizonten zoals de kleiaccumulatiehorizont (Bt) of de podzol B horizont (Bh, Bs) en het moedermateriaal (C-horizont), kan de omtrek van de originele verstoring door de boomstronk en de wortels wel nog langer zichtbaar zijn, maar is de organische stof volledig verteerd.

Voor de archeologie is het identificeren van boomstronkstructuren uitermate belangrijk. Een concentratie van artefacten in een bosgebied, dat oorspronkelijk aan het bodemoppervlak lag, maakt een goede kans om na een paar millennia verspreid te zijn over een diepte van meerdere decimeters. Wat betreft de archeologische structuren in de bodem, zal het bovenste deel ervan geleidelijk aan verdwijnen in de biologische actieve laag. Het is slechts de aanwezigheid van resistente materialen zoals lithische artefacten, ecofacten en houtskoolconcentraties in de diepere horizonten die getuigt van verdwenen boomstronken en wortels die niet langer zichtbaar zijn in de bodem.

We besluiten dus dat de uiteindelijke bodemvermenging als gevolg van de cyclus van groei, sterfte en vertering van boomstronken en wortels, een zeer belangrijke en vaak onderschatte verstoring is van archeologische sites in bosbestanden.

Oppervlakte ingenomen door boomstammen en -stronken, na verloop van tijd:

Het **grondvlak** van een bos is de totale oppervlakte van de stamdoorsneden van alle bomen op borsthoogte (1,5 m), uitgedrukt in vierkante meter per hectare (En.: *basal area*; Fr.: *surface terrière*).

1. Voor een goed ontwikkeld bos van de gematigde streken (Frankrijk) schat men dat het grondvlak van de boomstammen ongeveer 22 m²/ha bedraagt (Inventaire Forestier National, 2011), voor Vlaamse bossen ligt het gemiddelde tussen 20-30 m²/ha (Goris, 2007).
2. Aan het maaiveld nemen de boomstronken een beduidend grotere oppervlakte in dan het grondvlak. We kunnen aannemen dat het grondvlak vermenigvuldigd moet worden met een factor 2 (figuren V9-V18).
3. Voor het Holoceen, dat zo'n 10.000 jaar heeft geduurd, kunnen we ramen dat er ongeveer 50 generaties bomen hebben gegroeid.

Door deze drie gegevens te combineren, kunnen we berekenen dat tijdens de laatste 10.000 jaar, op een gebied van 1 hectare (10.000 m²) ongeveer 2.200 m² werd ingenomen door boomstronken (grondvlak x factor x generaties: 22 x 2 x 50 = 2.200 m²).

Dit cijfer houdt geen rekening met de bomen die groeiden tijdens het Laatglaciaal, een periode van ongeveer 5.000 jaar voorafgaand aan het Holoceen. Tijdens deze periode was de boomedichtheid bijlange niet zo hoog als tijdens het Holoceen. Voor beide periodes samen kan men dan veronderstellen dat ongeveer 22 % + 3 % = 25 % van het bodemoppervlak ooit ingenomen is door stronken.

Deze schatting komt echter niet overeen met de terreinobservaties. In het Zoniënwoud werden tijdens de voorbije decennia een 60-tal bodemprofielen geopend. Slechts 2 bodemprofielen vertoonden zichtbare sporen van een boomstronk en zijn wortels. Volgens de inschatting hierboven uitgelegd, zouden ongeveer 25 %, of 15 van de 60 bodemprofielen sporen van boomstronken en wortels moeten bevatten. De meeste stronkstructuren zijn dus niet langer zichtbaar in de bodem.



Fig. V9-V10: Beukenbestand, zo'n 150 jaar oud. De diameter en het volume ingenomen ter hoogte van de boomstronk is duidelijk groter dan op 1,5 m hoogte van de stam. Zoniënwoud, België.

Voorbeelden van boomstronken op archeologische opgravingen en in de natuur (figuren V11-V23)



Fig. V11-V12: Boomstronken van eik en naaldhout. Haelen-Broekweg, provincie Limburg, Nederland. (Bats *et al.*, 2010).



Fig. V13-V14: Ondergronds wortelgedeelte van de boomstronk. Zoniënwoud, België.



Fig. V15: Boomstronk van *Pinus sylvestris*. Brecht, Moorde-naarsven, provincie Antwerpen, België. (Mikkelsen *et al.*, 2002a).



Fig. V16: Eucalyptusstronk. Kustduinen, Galicië, Spanje.



Fig. V17: Eikenstronk uit een oud eikenbestand. Sighisoara, Roemenië.



Fig. V18: Halfvergane eikenstronken. Lac du Der-Chantecoq, departementen van Marne en Haute-Marne. Frankrijk.



Fig. V19-V21: Verschillende manieren waarop boomstronken vergaan.

Fig. V19: Van buitenuit (eik). Forêt de Compiègne, departement Oise, Frankrijk.

Fig. V20: Van binnenuit (es). Kuststreek, provincie West-Vlaanderen, België.

Fig. V21: Van binnenuit (beuk). Verrewinkelbos, Ukkel, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België.



Fig. V22: Eikenstronken vergaan eerst aan de buitenzijde. Dit maakt het gemakkelijker indien later de boomstomp uit de grond moet gehaald worden. Forêt de Compiègne, departement Oise, Frankrijk.



Fig. V23: Een collectie losse eikenstronken verzameld door een boswachter. Zoniënwoud, België.

Turbatie door wortels van struiken en grassen (figuren V24-V29)



Fig. V24: Wortels in weggespoelde oppervlaktebodem van alluviaal bos. Semois rivier, België.



Fig. V25: Populierenwortels in een zandige bodem. Glesborg, Denemarken. (Mikkelsen *et al.*, 2006, 2007).



Fig. V26: Struik- en boomwortels onder hagen zijn zeer talrijk in de bovenste sterk gebioturbeerde bodem. Terralba, Sardinië. (Langohr & Nicosia, 2011).



Fig. V27-V28: Graswortels kennen een veel grotere turnover (leven/afsterven) dan boomwortels. Hierdoor kunnen zij over lange perioden sterk bijdragen tot de bodembioturbatie. Vulkanische asbodem, South Island, Nieuw-Zeeland. (Bubel, 2003).

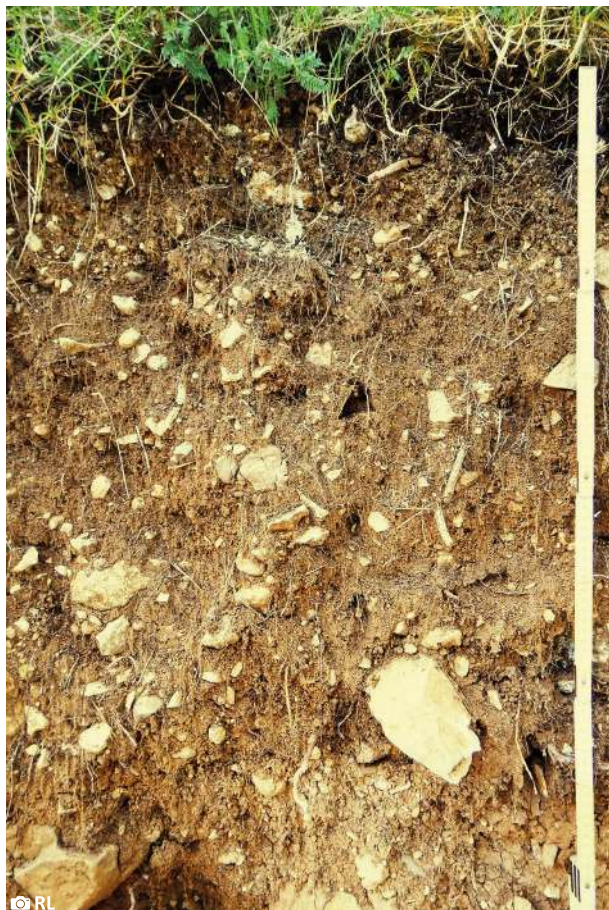


Fig. V29: Graswortels kunnen een grote dichtheid bereiken tot meer dan 1 m diepte. Kalkrijke bodem, Saldaña, Spanje.

2. Ontwortelde bomen

Er bestaat een zeer uitgebreide literatuur over ontwortelde bomen (En.: *tree windthrow*; Fr.: *chablis*) (figuren V30-V40). De meeste publicaties zijn geschreven in het kader van bodemkunde en bosbouw. De referenties naar archeologische sites zijn eerder beperkt.

De term ‘ontwortelde boom’ wordt hier gedefinieerd als een ‘ontwortelde boom die het resultaat is van een natuurlijke val van een boom’. De term ‘windworp’ wordt gebruikt om het omwaaien van een boom, waarbij de boom ontworteld wordt, aan te duiden (Van Hemelrijck *et al.*, 2004). Het kappen of vellen van bomen door de mens of het doorknagen door bevers valt niet onder deze definitie.

In de natuur zijn wind, sneeuw, ijs, de val van een andere boom, ouderdom en ziekte, de belangrijkste factoren verantwoordelijk voor het ontwortelen van bomen. Ook de mens kan indirect een rol spelen.



Fig. V30-V32: Bomen ontworteld door cycloon Lothar in december 1999. Zoniënwood, België.



Fig. V33: Sporen van windworpstructuren op een archeologische site worden zichtbaar na het verwijderen van de ploeglaag. Kalkrijke bodem, Reims, departement Marne, Frankrijk.

350 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

Ontwortelde bomen, het resultaat van ziekte en afsterven (figuren V34-V37)



Fig. V34-V35: Ontwortelde bomen in een coniferenbos. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.



Fig. V36: Fijnsparren (*Picea*). Karpaten, Polen.



Fig. V37: Esdoorn. Woluwe park, Sint-Pieters-Woluwe, België.

Ontwortelde bomen als gevolg van brand (figuren V38-V40)



Fig. V38: In een boreaal bos komt in de zomer een natuurlijke brand frequent voor door blikseminslag. Noord-Finland.

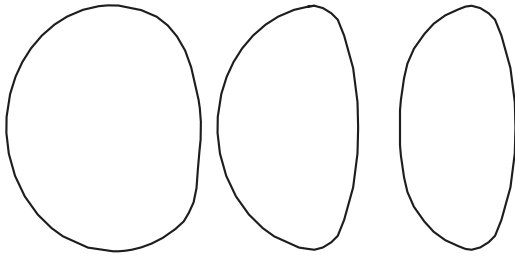


Fig. V39: Ontwortelde boom als gevolg van brand. De bodemkruit is zo'n 40 cm dik wat overeenkomt met de actieve laag op de permafrost. Northwest Territories, Canada.



Fig. V40: Intensieve brand in een coniferenbos. Yellowstone National Park, USA.

De microdepressie of kuil die ontstaat na een windworp heeft de vorm van een hoefijzer of een letter 'D' en kan een diameter aan het maaiveld van 5 tot 7 m bereiken (figuren V41-V51). De kuil kan tot 2 m diep onder het maaiveld gaan, en heeft meestal een asymmetrische vulling (figuren V55, V87-V91, V105-V107, V113-V119). Dikwijls is de kuil geassocieerd met een microheuvel afkomstig van de aarde die de stronk en het wortelstelsel hebben opgetild.



Na het volledig vergaan van de boomstronk en de wortels, wat meer dan een eeuw kan duren (figuren V8, V1-V7), zal er een microtopografie overblijven van een kuil of een depressie en hiermee geassocieerd een verhoging of bult (En.: *pit and mound of cradle-knoll*).

Fig. V41: Omtrek van een kuil gevormd na een boomworp op een horizontaal vlak, gaande van bijna cirkelvormig (links) kenmerkend voor het 90° kantelen in de put (diepste facies – zie verder) tot meer ovaalvormig (rechts). De lengtes kunnen oplopen tot 5-7 m, de dwarsas is meestal 2-5 m breed.



Fig. V42: Naarmate de stronk en de wortels verteren onder invloed van het klimaat (regen, vries/dooi, droog/vochtig cycli) en gravende dieren zoals konijnen, zal de wortelkluit afbrokkelen tot dat de hellingen van de bult/kuil ongeveer een helling van 30° bereiken. Deze hellingsgraad wordt doorgaans beschouwd als stabiel mits de helling permanent begroeid is. Zoniënwoud, Groenendaal, provincie Vlaams-Brabant, België.

Voorbeelden van microreliëf gevormd door windworpen (figuren V43-V52)



Fig. V43-V46: Vier voorbeelden van de evolutie van de bult/kuil structuur na het verteren van de boomstronk.

Fig. V43: Kolisbos, Neerpelt, provincie Limburg, België.

Fig. V44 en fig. V46: Zoniënwoud, Groenendaal, provincie Vlaams-Brabant, België.

Fig. V45: Forêt de Villé, département Bas-Rhin, Frankrijk.



Fig. V47-V50: Vier voorbeelden van een stabiele bult/kuil microtopografie van de bosbodem als gevolg van ontwortelde bomen. Fig. V47-V49: Zoniënwoud, België. Fig. V50: Sint-Truiden, provincie Limburg, België.



◀ Fig. V51: Kenmerkende kuil in 'D' vorm. De boom is naar rechts gevallen. De beperkte bultmorphologie rondom de kuil wijst op een windworp van het diepste faciës. Zoniënwoud, België.

Fig. V52: Ontboste zone met uitgebreide bult/kuil microtopografie als gevolg van ontwortelde bomen. West-Moldavia, Roemenië.



De afwezigheid van windworpmicrotopografie in Belgische bossen is een indicator voor de nivellering van de bodem, mogelijk geassocieerd aan landbouw (figuren V53, V54)



Fig. V53-V54: Zeer vlak bodemoppervlak in het Meerdaalwoud als gevolg van intensieve landbouwactiviteit in de Romeinse periode en misschien reeds eerder. In het Zoniënwoud kan men deze nivelleringspraktijken slechts observeren in beperkte zones die volgens historische gegevens van priorijen van de 19de eeuw onder landbouw waren. De 'slash and burn' (Fr.: *écobuage*) teelttechniek zoals toegepast op het Ardens plateau, produceert eveneens een vlak bodemoppervlak.

3. Typologie van windworpstructuren

De morfologie van de ontworteling, de uiteindelijke microtopografie en de hiermee geassocieerde bodemmorfologie, zijn afhankelijk van de weersomstandigheden, het bodemtype, de topografie en de boomsoort. Langohr (1993) onderscheidt 8 morfologische types van ontwortelde bomen waarvan de impact op de archeologische structuren en de verspreiding van archeologische artefacten varieert (figuur V55). In bepaalde regio's zoals de leemstreek van Midden-België en de dekzanden van Noord-België, wordt geschat dat ontwortelde bomen, in de laatste 15.000 jaren verantwoordelijk zijn voor een verstoring over ongeveer 10 % van het bodemlandschap en dit tot zeker 80 cm diepte.

Fig. V55: Classificatie van bodemstructuren te wijten aan ontwortelde bomen (Bron: Langohr, 1993).

Legende: zwart: de humusrijke oppervlaktehorizont (A-horizont); punten: de klei-uitlogingshorizont (E) en biologisch actieve laag (B β , talrijke wortels); verticale lijnen: B- horizont (kleiaanrijking of podzol B); verstrooid patroon: verstoorde bodem; rasterpatroon: nieuwe A-horizont.

Links (b1,c1...): de structuur vlak na de ontworteling.

Rechts (b2, c2...): wat achterblijft na de volledige vertering van de stronk en de wortels en stabilisatie van de bodem, de 'bult/kuil' morfologie.

De schaal is niet aangeduid aangezien de afmetingen sterk kunnen variëren. De structuur in type 'i' kan tot 2 m diep gaan.

Belangrijk voor de archeologie: in de veronderstelling dat er oorspronkelijk artefacten aanwezig waren in de oppervlaktehorizont (de zwart gekleurde horizont op de figuren) kan men nagaan waar deze na verloop van tijd zullen verspreid liggen (kolom 2).

a: origineel bodemprofiel.

b: de boom is 90° gekanteld. De wortelkruit ligt volledig buiten de kuil. Kenmerkend voor bomen met een ondiep wortelstelsel. De gekantelde A-horizont valt neer op de originele bodem. De originele bodemhorizontatie is verloren.

c: de boom is 90° gekanteld maar de wortelkruit ligt volledig in de depressie. Eindsituatie met nog resten van de originele bodemhorizonten. Dit maakt het mogelijk om eeuwen later nog de horizonatie van de originele bodem te achterhalen.

d: de boom is hellingafwaarts 90° gekanteld. De originele horizonatie is verloren.

e: de boom is minder dan 90° gekanteld. De originele horizonatie is gedeeltelijk bewaard ter hoogte van de oppervlaktehorizonten.

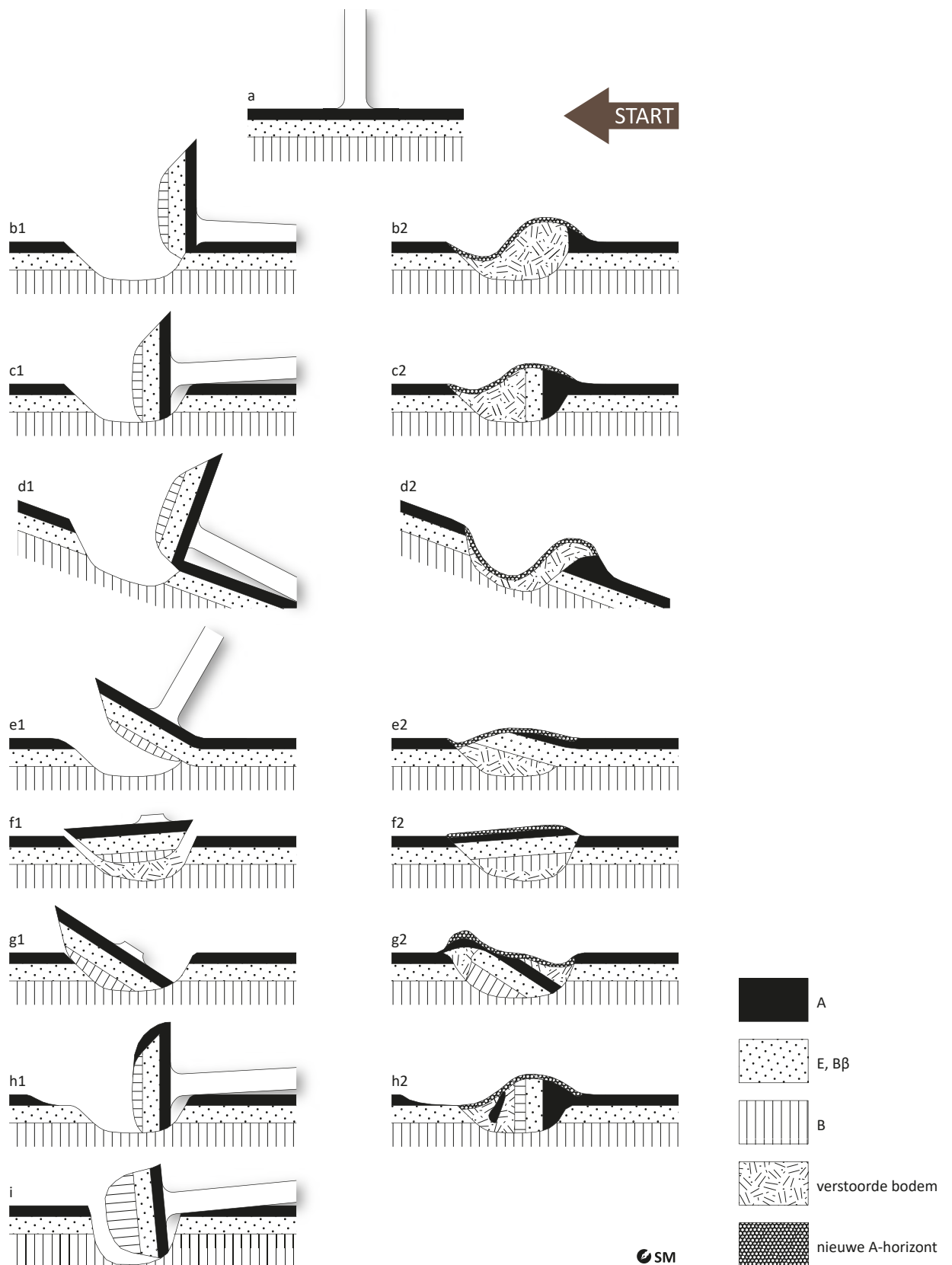
f: de ontwortelde boom is volledig teruggevalen in de depressie na het verwijderen van de boomstam door de houthakkers. Deze variant van een windworp veroorzaakt een minimale verstoring in de bodem, hierdoor is het soms moeilijk om de windworp te herkennen tijdens veldwerk.

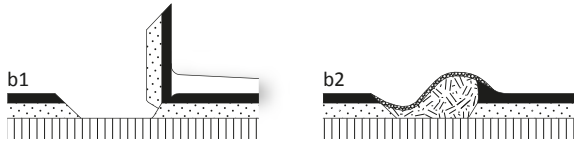
g: de ontwortelde boom is gedeeltelijk teruggevalen in de depressie na het verwijderen van de boomstam door de houthakkers. Meestal was de boom oorspronkelijk 90° gekanteld zoals bij het type 'c'. De originele bodemhorizontatie is nog gedeeltelijk bewaard.

h: de ontwortelde boom is 90° gekanteld zoals in type 'c', maar de sterk doorwortelde oppervlaktehorizont (zodeflap) is over een groot oppervlak meegetrokken. Artefacten kunnen nu in twee concentraties voorkomen: ter hoogte van het 90° gekanteld profiel en achter de wortelkruit.

i: 90° gekantelde boom blijft volledig in de depressie liggen, zoals in type 'c', maar de depressie is veel dieper, kleiner in oppervlak en begrensd door steile wanden. In optimale condities is het origineel bodemprofiel bewaard.







BOOM IS GEKANTELD BUITEN DE KUIL - ONDIEP FACIËS (figuren V56-V62).

Komt voor op sites met:

- bodemverdichting door intensieve betreding,
- grondwatertafel die tot dicht bij het oppervlak komt,
- bodem op ondiep gesteente of op compacte horizont,
- lage bodemtemperatuur.

De wortelschijf kan relatief groot zijn, maar door het ondiep wortelstelsel veroorzaakt de ontwortelde boom een minimale bodemverstoring. Finale 'bult/kuil' topografie is beperkt.

Fig. V56-V57: Fijnsparren (*Picea*) op sterk hydromorfe bodem met ondiepe stuwwatertafel en zeer oppervlakkig wortelstelsel. Fig. V56: Van de boom rechts is de flap van de A-horizont meegetrokken tijdens de val. Ardens plateau, België.



Fig. V58: Beuk op bodem verdicht door bosontginning. Zoniënwood, België.

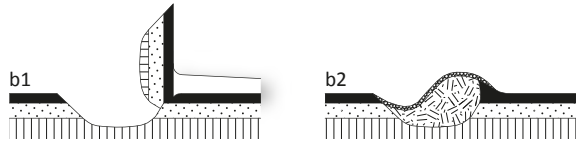


Fig. V59: Beuk op door paarden sterk betreden leembodem. Zoniënwood, België.



Fig. V60-V62: Ontwortelde bomen in het boreaal bos (taiga). Oppervlakkig wortelstelsel door de aanwezigheid van rotsen op geringe diepte. Links en midden: Noord-Noorwegen; rechts: Zuid-Noorwegen.

360 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



ONTWORTELDE BOOM GEKANTELD BUITEN KUIL - DIEP FACIËS (figuren V63-V69).

De originele bodemhorizonatie gaat verloren.



Fig. V64: Haagbeuk. Woluwe park, Sint-Pieters-Woluwe, België.



Fig. V66: Beuk. Verrewinkel Bos, Ukkel, België.



Fig. V67: Eik. Frankrijk.



Fig. V63: Eik. Hallerbos, België.



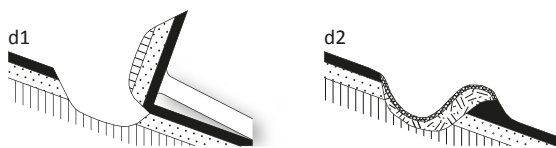
Fig. V65: Eik. Groenendaal, België.



Fig. V68: Beuk. Bovelos Bos, België.



Fig. V69: Beuk. Zoniënwood, België.



ONTWORTELDE BOOM OP EEN HELLING (figuren V70-V73).

De originele bodemhorizonatie is verloren.



Fig. V70: Beuk. Zoniënwood, België.



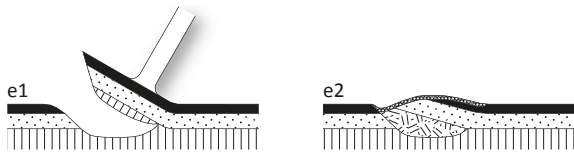
Fig. V71: Eik. Füllinsdorf, Zwitserland.



Fig. V72: Beuk. Kroatië.



Fig. V73: Beuk. Kroatië.



BOOM IS MINDER DAN 90° SCHUIN GEKANTELD (figuren V74-V79).

De originele horizonatie is gedeeltelijk bewaard ter hoogte van de oppervlaktehorizonten.



Fig. V75: Den. Normandië, Frankrijk.



Fig. V77: Beuk. Zoniënwood, België.



Fig. V78: Beuk. Zoniënwood, België.



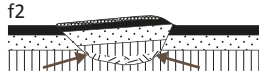
Fig. V74: Den. Normandië, Frankrijk.



Fig. V76: Els. Famenne, België.



Fig. V79: Den. Vogezes, Frankrijk.



DICHTGEKLAPT FACIËS (figuren V80-V83).

De ontwortelde boom is volledig teruggevallen in de depressie. Deze variant van windworp veroorzaakt een minimale verstoring in de bodem en is meestal gebonden aan de bosontginning van de ontwortelde bomen.



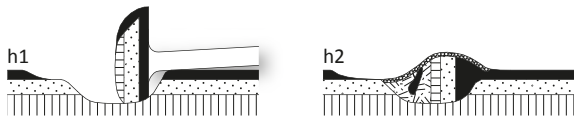
Fig. V80: Het terug dichtklappen van de ontwortelde boom is nooit 100 % perfect. Rondom de ontwortelde boom zijn er openingen waar water kan inspoelen en waar dieren een schuilplaats kunnen vinden. Beuk. Zoniënwoud, België.



Fig. V81-V82: Recent dichtgeklapte structuren na ontginning. Beuk. Zoniënwoud, België.



Fig. V83: Voorbeelden van oudere dichtgeklapte structuren. Zoniënwoud, België.



ONTWORTELDE BOOM MET ZODE FLAP (figuren V84-V86; zie ook fig. V56, V62).

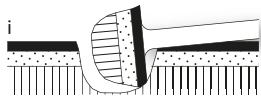
Boom is 90° gekanteld, de sterk doorwortelde oppervlaktehorizont (zodeflap) is over een groot oppervlak meegetrokken. Artefacten kunnen ter hoogte van het 90° gekanteld profiel voorkomen voor en achter de wortelkluit.



Fig. V84: Beuk. Zoniënwoud, België.



Fig. V85-V86: Dennen. Normandië.



ONTWORTELDE BOOM IS VOLLEDIG IN DE DEPRESSIE GEKANTELD - DIEPSTE FACIËS (figuren V87-V91).

Ontwortelde boom met uitzonderlijk diep wortelstelsel (situatie 'i').

Oorzaak: Gezonde boom, ofwel omvergeduwd/meegesleurd door een andere boom (domino-effect), ofwel gevallen tijdens een uitzonderlijk sterke storm.

Morfologie:

- diepste kuil (soms tot 2 m diep),
- kuil met zeer rechte wanden,
- oppervlak kuil relatief klein, min of meer ronde omtrek,
- wortelkluit min of meer circulair rond boomstronk,
- er blijft meestal een open ruimte ter hoogte van de basis van de stam (pijlen, figuren V88-V91),

- de 90° rotatie grijpt plaats in de kuil met als gevolg een uitzonderlijk goed bewaard gekanteld bodemprofiel, ideaal voor bodem- en milieureconstructie,
- de finale bult/kuil topografie is beperkt.

Voor de archeoloog is het herkennen van windworststructuren van tweeërlei belang. Ten eerste bestaat het risico dat de bodemstructuur gevormd door onwortelde bomen wordt geïnterpreteerd als een structuur van menselijke oorsprong wat inhoudt dat ze tijdens de opgraving in detail wordt bestudeerd. Het is dus niet ongebruikelijk om in rapporten of publicaties tekeningen of foto's te zien van constructies die worden geïnterpreteerd als 'hutkommen', nochtans vertonen ze een brede waaier van kenmerken van onwortelde bomen. Ten tweede zijn onwortelde bomen, klein en groot, één van de belangrijke processen verantwoordelijk voor het verplaatsen van artefacten. Artefacten die aan het oppervlak lagen of zich in de bodem bevonden, kunnen door onwortelde bomen in alle richtingen, zowel lateraal als verticaal, verspreid worden (Langohr & Crombé, 1999).



Fig. V87: Het domino-effect: links is een ontwortelde beuk te zien, die een andere beuk (rechts) omver heeft geduwd. Zoniënwood, België.



Fig. V88-V91: Vier voorbeelden van het diep facies van ontwortelde bomen, het resultaat van de cycloon Lothar, december 1999. De boomstronk en grondkruit zijn 90° gekanteld in de kuil. Er ontstaat een ruimte ter hoogte van de basis van de stam (pijl). Deze holte zal zich geleidelijk aan opvullen met afbrokkelende aarde van de oppervlaktehorizonten. Fig. V88: Zoniënwood, België; fig. V89: Bouvelobos, Wortegem-Petegem, provincie Oost-Vlaanderen, België; fig. V90-V91: Frankrijk.

De mogelijkheid om deze bijzondere bodemstructuren op te sporen, hangt sterk af van enerzijds het type van boomontworteling en anderzijds van het bodemtype.

Van de acht soorten ontwortelde boomstructuren voorgesteld door Langohr (1993) (figuur V55), zijn er twee types, 'b' en 'd', die moeilijk te herkennen zijn eens het hout van de stronken en wortels verteerd

zijn (figuren V56-V62, V70-V73). Dit komt omdat net bij deze twee types de originele bodemhorizonten niet langer te herkennen zijn. Figuren V92-V95 tonen nog andere situaties die eveneens de identificatie van een ontwortelde bomen bemoeilijken zoals het geval is bij kleine en/of zieke bomen.

**Situaties die de identificatie van ontwortelde bomen bemoeilijken: kleine en/of zieke bomen - Zoniën-
woud, België (figuren V92-V95)**



Fig. V92: Veel kleine bomen in een bosbestand, kunnen door ontworteling toch relatief veel bodemmateriaal verplaatsen.



Fig. V93: Eik. Zieke bomen verplaatsen minder bodemmateriaal omdat ze omvallen wanneer een deel van de wortels al afgestorven is.



H1: Ah: slechts enkele cm dik, wat wijst op een zeer beperkte activiteit van borende dieren (regenwormen, mollen...).

H2: A: dunne overgangshorizont.

H3: B β : biologisch actieve horizon, talrijke wortels.

H4: Btx: fragipan horizon met scherpe bovengrens. Het horizontaal vlak toont het polyonaal patroon van de originele krimp-scheuren.

H5: Bt: diepere horizon zonder fragipan kenmerken.

◀ Fig. V94: Verstoringen door het omvallen van kleine bomen zijn hoofdzakelijk actief in de 'biologisch actieve horizon' (0-32/43 cm diepte) en zijn later morfologisch niet meer observeerbaar door de intense bioturbatie kenmerkend voor deze horizon.



Fig. V95: Haagbeuk.

Markante voorbeelden van ontwortelde bomen (figuren V96-V103).



Fig. V96-V97: Hangende beuk. Zoniënwood, België.

Fig. V98-V99: Groepje van 5 wilgen voor en na het omvallen van de bomen. Bemel, Sint-Pieters-Woluwe, België.



Fig. V100: De ontwortelde beuk is 180° geroteerd. Zoniënwood, België.

Fig. V101: Dubbele windworp. Haagbeuk. Zoniënwood, België.



Fig. V102: Recreatiezone in het bos waarbij een windworp een speelkamp wordt. Zoniënwood, België.

Fig. V103: Wees voorzichtig tijdens een storm in een bosbestand! Zoniënwood, België.

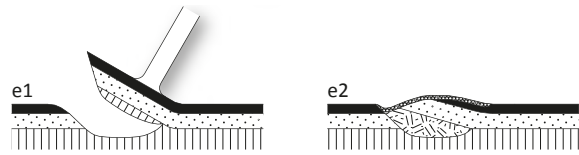
4. Windworpstructuren in het bodemprofiel

Wanneer de ontworteling gebeurde in een bodem met duidelijk uitgesproken horizonten, zoals een podzol of een bodem met een kleiaanrijkingshorizont, zal de interpretatie van de windworp relatief eenvoudig zijn (figuren V104-V119). In het geval van een bodem met weinig uitgesproken horizonten, zoals een kleur- en/of structuur B horizont, is het onderzoek veel moeilijker (fig. V120-V122). Door de bodemevolutie kunnen dergelijke horizonten volledig vervagen zoals beschreven in de evolutie van sporen van boomstronken en wortels (zie §1). In ex-

treme gevallen kan het zijn dat de archeoloog, op basis van de verspreiding van de artefacten, argumenten naar voor brengt voor het proces van ontwortelde bomen daar waar de bodemkundige weinig of geen morfologische sporen opmerkt. Zo heeft Crombé (1996), dankzij een zorgvuldige studie, achterhaald dat talrijke concentraties van mesolithische artefacten in de zandgronden van Noord-België in de bodem gezakt zijn door het proces van ontwortelde bomen (figuren V120-V122).



Fig. V104: Windworp van het type 'e': gekantelde beuk (zie fig. V55). Zoniënwood, België.



WINDWORPSTRUCTUUR MINDER DAN 90° GEKANTELD (figuren V105-V107).

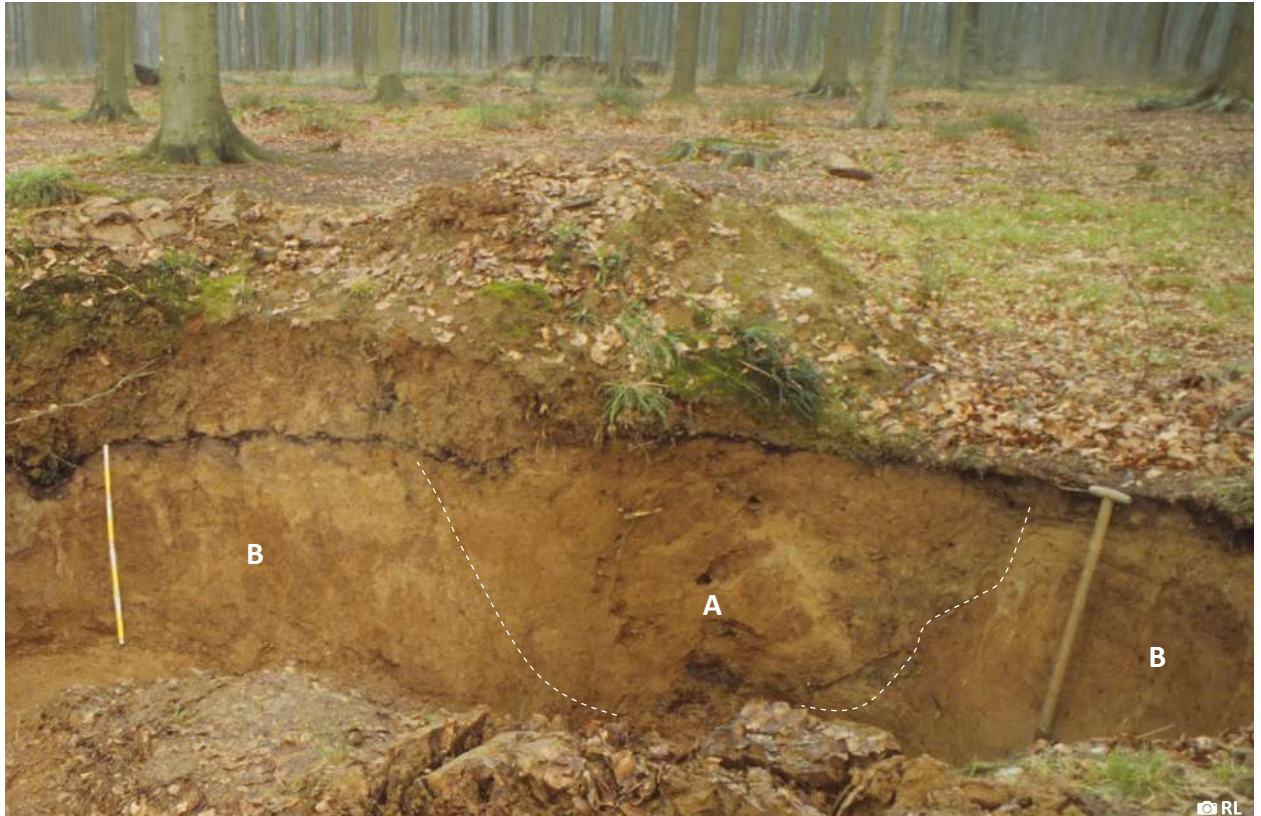


Fig. V105-V107: Bodemstructuur te wijten aan gekantelde windworp (A - stippellijn). Hier is de interpretatie relatief gemakkelijk omdat men de windworpstructuur (A) in het bodemprofiel op fig. V105 kan vergelijken met een 'normale' bodem (B) (geel-witte lat links is 1 m lang). Zoniënwood, België. Fig. V106: detail van het normale bodemprofiel, fig. V107: detail van de windworpstructuur.

370 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

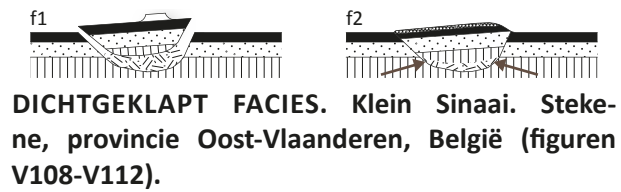


Fig. V108: Overzicht opgraving.



Fig. V109: De dichtgeklapte ontwortelde boom veroorzaakt relatief weinig verstoring t.o.v. het referentieprofiel (kader), maar op de ondergrens van de structuur is er een beetje ingespoeld sediment aanwezig (pijlen).

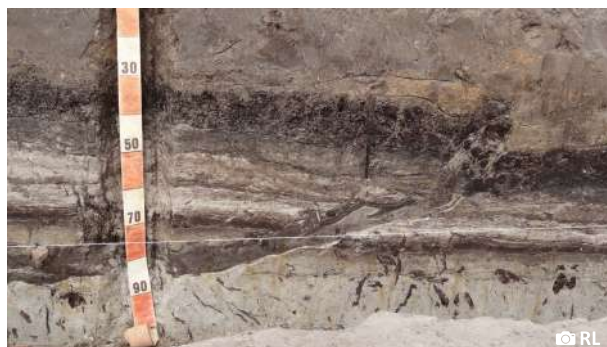


Fig. V110-V111: Details van de verstoring.

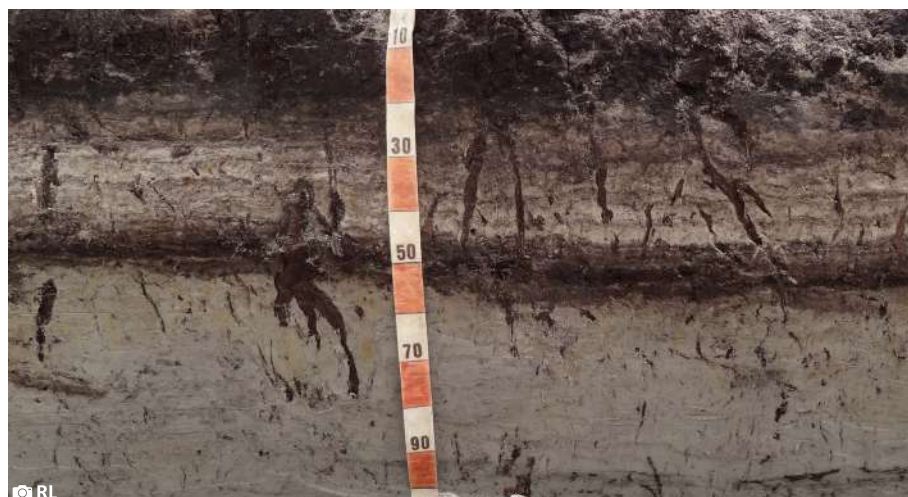
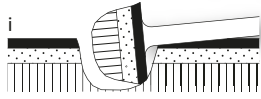


Fig. V112: Niet verstoorde bodem.



DIEPSTE FACIËS – IN HET BODEMPROFIEL (figuren V113-V119).

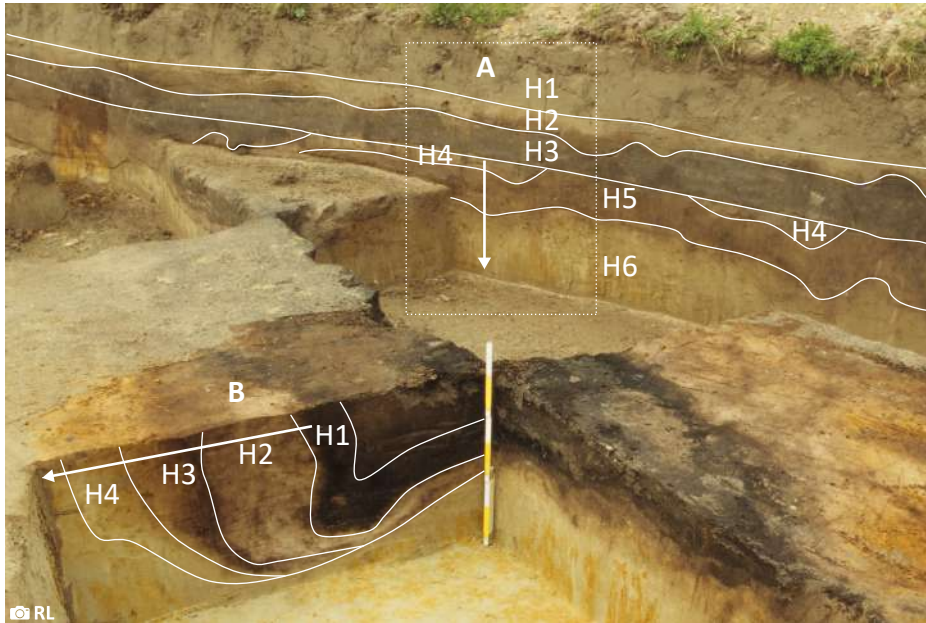


Fig. V113-V114: Bodemprofiel van een podzolbodem en een profiel door een diepe, 90° gekantelde ontwortelde boom. Het bodemprofiel en de windworpstructuur zijn hier uitzonderlijk goed bewaard. Meestal zijn deze structuren verdwenen door latere landbouwactiviteiten. Sint-Gillis-Waas, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Bourgeois *et al.*, 1996; Bourgeois & Hageman, 1998).

Fig. V113 en fig. V114 (detail): Het **huidig bodemprofiel (A)** met 3 ploeglagen Ap1 (H1), Ap2 (H2), Ap3 (H3), een restant van de licht gekleurde uitlogingshorizont E (H4), een podzol Bh1-horizont (H5) (grondwaterpodzol) en de diepere B horizon met roestvlekken kenmerkend voor sterk fluctuerende grondwater tafel (Bl) (H6).

Fig. V113: Het **oorspronkelijke bodemprofiel (B)** is bewaard in de zone van de gekantelde boomworp. De boomworp is ouder dan de bodembewerking, waardoor er geen ploeglagen aanwezig zijn. Het bodemprofiel bestaat uit de originele zwarte humusrijke oppervlakte A-horizont (H1) kenmerkend voor een zeer natte bodem (iets weinig) met daaronder het profiel van een grondwaterpodzol met de licht gekleurde uitlogingshorizont E (H2), de humusaccumulatiehorizont van de grondwaterpodzol Bh1 (H3) en de diepere Bl (H4) (pijlen tonen de overeenkomstige horizonten in en naast de windworpstructuur).

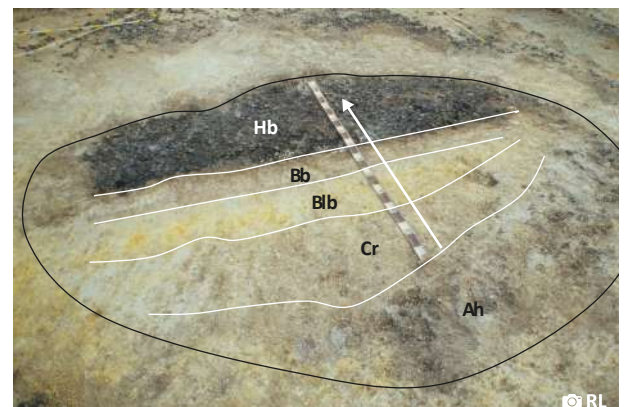
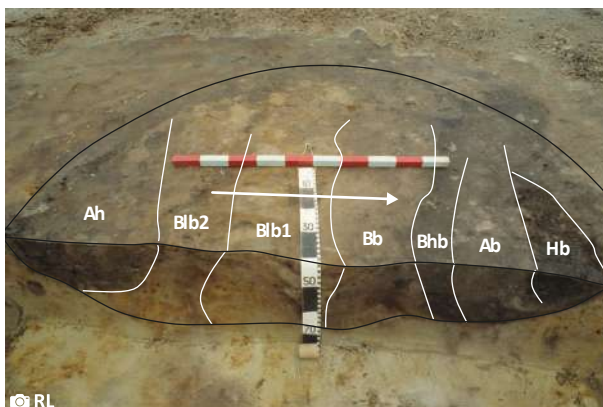


Fig. V115-V116: Twee voorbeelden van een windworp waarbij het volledige bodemprofiel 90° is gekanteld. Doordat het bodemprofiel zich in de kuil van de ontwortelde boom bevindt, is deze goed bewaard gebleven en vormt ze zo een getuigenis van het bodemlandschap dat aanwezig was op het moment van de windworp. De structuur is cirkelvormig met een diameter van slechts 2-3 m. De originele humusrijke oppervlaktehorizont (Ah) is gedeeltelijk ingestort in de holte ter hoogte van de basis van de boomstam (de pijl toont de valrichting, zie ook fig. V90-V91). Fig. V115: Sint-Gillis-Waas, provincie Oost-Vlaanderen, België; fig. V116: Avenay, departement Calvados, Normandië, Frankrijk.

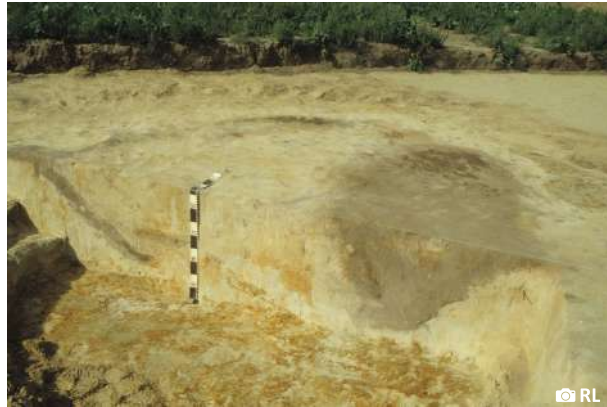
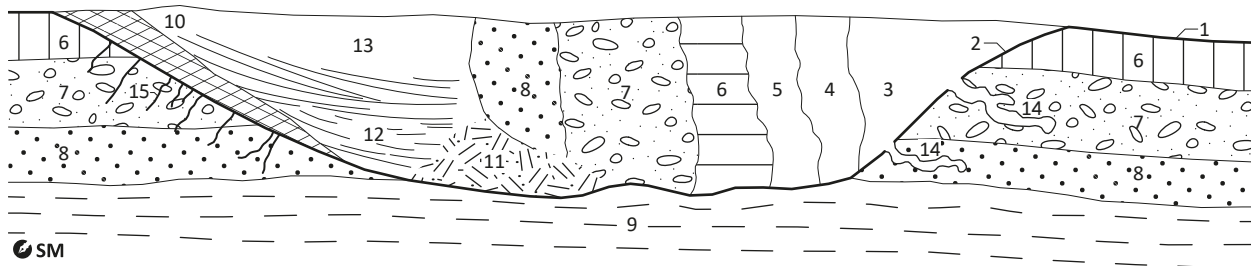


Fig. V117-V118: Spoor van een diepe windworp, horizontaal vlak en doorsnede. Aalter Woestijne, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Langohr & Fechner, 1993).



- 1: Ondergrens van de huidige ploeglaag.
- 2: Ondergrens van de microdepressie gevormd door de windworp.
- 3, 4 en 5: Restanten van de bovenste horizonten van het oorspronkelijke bodemprofiel. Als gevolg van erosie en/of ploegen zijn deze horizonten niet meer aanwezig in de omringende bodem.
- 6, 7 en 8: Diepere bodemhorizonten waarneembaar in zowel de windworpstructuur als in de omringende bodem.
- 9: Diepe horizont met beperkende eigenschappen voor beworteling en waarvan de bovengrens grotendeels samenvalt met de ondergrens van de windworpstructuur.
- 10: Bodemhorizont rijk aan organisch materiaal door de plantengroei en de biologische activiteit op de bodem van de kuil die relatief lang stabiel is gebleven; soms kunnen sporen van dieren voorkomen die kwamen drinken in de tijdelijke plas.
- 11: Losse vulling, grond voornamelijk afkomstig van de gekantelde boomstronk.
- 12: Gelaagde sedimenten met kenmerken van een fluctuerende grondwatertafel.
- 13: Ongedifferentieerde vulling.
- 14: Sporen van gravende dieren die profiteerden van de depressie om hun gangen te graven.
- 15: Sporen van wortels en kleine gravende dieren zoals regenwormen die in de humusrijke horizont leefden.

Fig. V119: De meest voorkomende kenmerken van de bodemmorfologie van een diep faciës van een windworp. (Bron: Langohr, 1993).

Het originele bodemtype vertoont niet altijd uitgesproken bodemhorizonten. Hierdoor is de windworpstructuur moeilijk zichtbaar. Vaak is het noodzakelijk om hier diepere en bredere profielen te graven dan enkel de zone die van archeologisch belang is om een juist beeld te krijgen van het proces van natuurlijke versterking (figuren V120-V122).

Grotere en diepere profielen zijn nodig - Opgraving Vinderhoute (Baes & Langohr, 1987) (figuren V120-V122)



Fig. V120: Het originele bodemtype, zonder uitgesproken bodemhorizonten. Hierdoor is de windworpstructuur moeilijk zichtbaar. Vandaar de noodzaak om het profiel dieper en breder te maken.

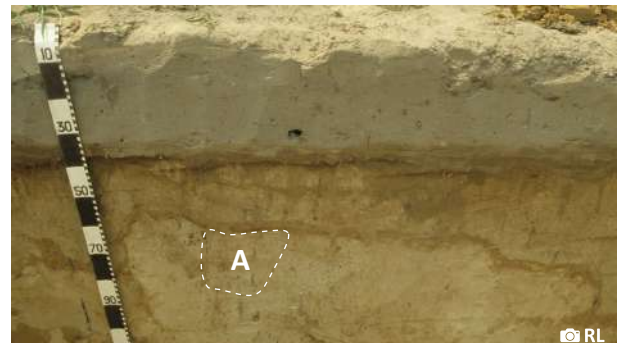


Fig. V121: Tijdens de opgraving werd een concentratie van artefacten gevonden op een diepte van 60-90 cm (A).

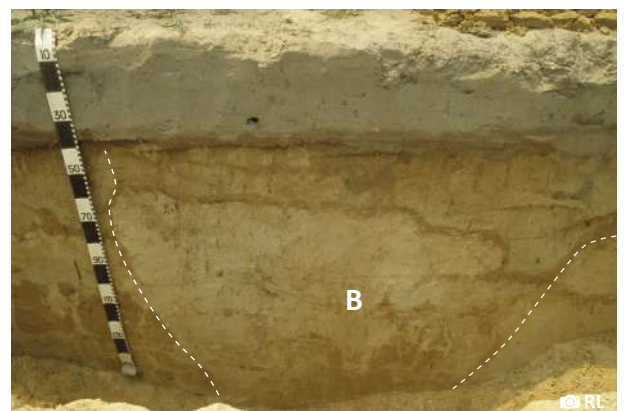


Fig. V122: Wanneer het profiel dieper en breder uitgegraven is, toont het duidelijk dat de concentratie van artefacten zich in een windworpstructuur (B) bevindt. De boom is naar links gevallen (steilere helling van de structuur).

5. Windworpstructuren, kansen voor biodiversiteit

De ontwortelde bomen en de windworpstructuren verhogen de biodiversiteit. Dood hout is een voedselbron voor paddenstoelen, talrijke insecten,

zoals bijvoorbeeld kevers, vliegen, muggen, nachtvlinders, of een woonplaats voor vogels en kleine zoogdieren. De microtopografie van de bult en kuilstructuur van een windworp vormt een drinkplaats, voedingsplaats, schuilplaats en een belangrijk habitat voor talrijke organismen (Zoniënwood, België) (figuren V123-V132).

Geassocieerde biologische activiteit: drinkplaats, voedingsplaats, schuilplaats en belangrijk habitat voor talrijke organismen, zowel dieren, hogere planten, mossen, varens en fungi - Zoniënwood, België (figuren V123-V132)

Fig. V123: De windworp creëert een open plek in het bos wat de kolonisatie door vegetatie bevordert.



Fig. V124: Een windworp kan een belangrijk habitat worden voor amfibieën en insecten.



Fig. V125: Eens de windworpstructuur stabiel is, kunnen mossen op de aarde tussen de wortelkluut groeien.



Fig. V126: Voorbeeld van kolonisatie van brem op de windworpstructuur.



Fig. V127: Regeneratie van beuk op windworpstructuren.



Fig. V128: Galerijen van konijnen onder een windworp.



Fig. V129-V130: Voorbeelden van graafactiviteiten van kleinere dieren in en rond de wortelkluit.



Fig. V131-V132. Deze vuursalamander heeft een schuilplaats gevonden onder de dichtgeklapte windworp.

6. Wiegende bomen

Wanneer enkel oppervlakkige wortels aanwezig zijn, kan een boom tijdens een storm beginnen wiegen (En.: *tree sway*) (figuren V168-V177). Indien de oppervlakkige bodemhorizonten op dat ogenblik waterverzadigd zijn, kan deze op- en neerbeweging zo'n sterke druk in de bodem uitoefenen zodat modder tot enkele meters rond de boomstam uit de bodem spuit (figuren V133-V134). Boswachters noemen dit een 'pomper'. Dit is een signaal dat de boom riskeert om te vallen.

Fig. V133-V134: Wanneer de diepere bodemlagen voor langere perioden zuurstofarm zijn, sterven de wortels af en heeft de boom nauwelijks diepere wortels. Tijdens een storm kan zo'n boom beginnen wiegen. Indien de oppervlakkige bodemhorizonten op dat ogenblik waterverzadigd zijn, kan deze op- en neerbeweging zo'n sterke druk uitoefenen, dat modder uit de bodem spuit. Beuk, Zoniënwoud, België. (Langohr & Louwagie, 2000).



In de bodem kan men de (vroegere) aanwezigheid van een wiegende boom herkennen aan een bijzondere morfologie van min of meer horizontale zones met gestratificeerde sedimenten. Het zijn afwisselend laagjes gebleekte aarde (kwarts) en zwart humusrijk materiaal. Zo'n afzetting lijkt sterk op de sortering van sedimenten na een hevige regenbui in microdepressies met een vegetatieloos bodemoppervlak (figuren V135-V138). Dezelfde morfologie vormt zich ook in de bodem als gevolg van een waterbeweging in de bodem. Wanneer de wortelkluit

omhoog wordt getild, oefent ze een zuigkracht uit waardoor water onder de wortelkluit wordt gezogen. Als de bodem terugvalt, wordt dit water samen met wat grond onder druk gezet en zijdelings weggeperst langs de losgescheurde wortelkluit. Zo krijgt men door het wiegen van de boom een soort pompbeweging. De krachtige heen- en weerbeweging van het water verklaart deze bijzondere morfologie van stratificatie in de bodem (Langohr & Louwagie, 2000).



Fig. V135-V136: Profielwand doorheen een structuur van een wiegende boom met onregelmatige horizontaal gestratificeerde bandjes; V136: Horizontale doorsnede met afwisselend dunne bandjes van wit zand en organisch materiaal. Verrebroek-dok. Beveren, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Louwagie & Langohr, 2005).





Fig. V137: Structuur van een wiegende boom in de vulling van een Romeinse gracht.



Fig. V138: Detail van structuren gevormd door een wiegende boom in de vulling van een Romeinse gracht.

Fig. V137-V138: Maldegem Vake, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Langohr & Pieters, 1986; Pieters & Langohr, 1988).

7. Takken en pseudopalen

Wanneer een boom omvalt, kan het gebeuren dat een tak die min of meer loodrecht op stam groeit, het bodemoppervlak raakt waardoor hij afbreekt (figuren V139, V140). Het nog niet afgebroken deel van de tak, wordt dan met een grote kracht in de bodem geduwd. Zo'n tak kan tot meer dan 1 m diep in de bodem dringen (figuren V141-V147).

Fig. V139: Takken kunnen in de bodem dringen door natuurlijke windworp, tijdens bosontginning of een dode tak die valt.



Fig. V140: Op het ogenblik dat de tak de bodem raakt, kan hij afbreken (pijlen). Park Sint-Pieters-Woluwe, België.

De structuren in de bodem gevormd door afgebroken takken (figuren V145-V151) die in de bodem dringen, kunnen soms verward worden met deze van paalgaten. Toch zijn er een aantal verschillen:

- een buiging van de tak naarmate hij dieper in de bodem dringt,
- het einde van de tak is gesplitst als gevolg van het afbreken,
- de bodem rond en onder de tak is zeer sterk samengedrukt (wat ook het geval is bij palen die in de grond geklopt worden, maar niet bij palen die ingegraven zijn),

- wanneer de tak verrot, wat eeuwen kan duren, kan water in deze, met organische stof gevulde ruimte, binnendringen. Hierdoor ontwikkelt zich een sterke microbiologische activiteit die de aanwezige zuurstof volledig consumeert. Er ontstaat een sterk anaeroob milieu waardoor ijzer en mangaan, aanwezig in de bodem ter hoogte van de sterk verdichte zone, oplosbaar worden en verder weg migreren tot de zone die niet meer verdicht is en waar opnieuw zuurstof aanwezig is. Hierbij zal ijzer eerst neerslaan, iets verderop mangaan (figuur V148).
- later, als alle organische stof is verteerd, zal aarde van de hogere bodemhorizonten geleidelijk de min of meer verticale holte opvullen (figuur V148).

380 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

Soms kan een vallende tak (Figuur V143) die van een boom afgebroken is, eenzelfde structuur veroorzaken. Omdat het zwaartepunt van de afgebroken tak het dichtst bij de stam ligt, zal deze min of

meer verticaal naar beneden vallen en zich diep in de grond boren. Soms dringt zo'n tak zo diep in de bodem dat een persoon deze niet uit de grond kan trekken (figuur V143).

Takken en pseudopalen – 'jonge' structuren (figuren V141-V147)



Fig. V141-V142: De pijlen wijzen naar takken die in de bodem zijn gedrongen. Links wilg, rechts beuk. Park Sint-Pieters-Woluwe, België.



Fig. V143: Bij de val is een afgebroken tak in de bodem gedrongen. Zoniënwoud, België.



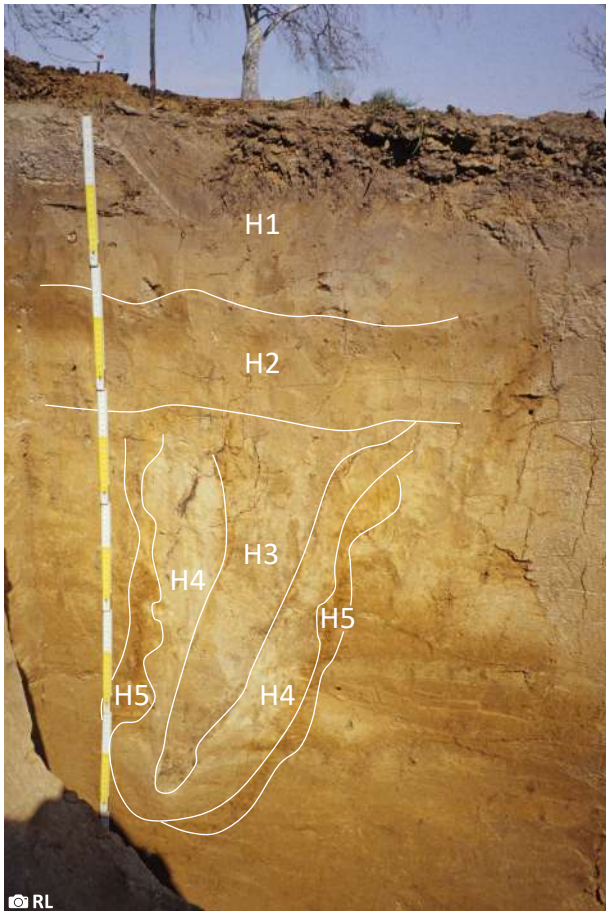
Fig. V144: Een tak van een beuk in de bodem geduwd. Zoniënwoud, België.

Fig. V145-V146: Overblijfsel van een tak op 130 cm diepte, afgebroken en in horizontale positie op deze diepte. Rond het hout is de bodem samengedrukt en anaeroob. Zoniën-
woud, België.



Fig. V147: Een tak van een beuk is in de bodem gedrongen. De bovenste decimeter van de tak is weggerot. Zoniën-
woud, België.

Takken en pseudopalen – In het bodemprofiel (figuren V148-V151)



H1: Ap: 0-30 cm; huidige ploeglaag.

H2: B β : 30-50 cm; sterk door regenwormen en mollen gebioturbeerde B-horizont.

H3: 50-120 cm; spoor van de ingedreven tak die de compacte klei-accumulatiehorizont (Bt) van de originele bodem doorkruist.

In de meeste gevallen buigt de tak om naarmate deze dieper in de bodem dringt; het einde van de tak splitst doorgaans tijdens het afbreken.

H4: tijdens de val wordt de bodem sterk samengedrukt. Bij het verteren van het hout en het insijpelen van water, ontstaat er een reducerend (anaeroob) milieu op de plaats van de tak. Het zuurstofloos water migreert door de samengedrukte bodemlaag en lost ijzer en mangaan op die neerslaan op de grens van de samengedrukte laag (H4/H5); dit soort gleyverschijnselen wordt in de bodemkunde een 'pseudogley' genoemd. De samengedrukte bodem loopt door rondom het einde van de ingedreven tak.

H5: ijzer- en mangaanneerslag in de niet verdichte bodem.

Fig. V148. Enkele basissenmerken van een tak die lang geleden in de bodem is gedrongen; vandaag zijn er in de bodem hiervan enkel sporen zichtbaar. Lössbodem, Velzeke, provincie Oost-Vlaanderen, België.

Fig. V149: Ingedreven tak in alluvium van de Bar rivier, Vendresse, departement Ardennen, Frankrijk. De kleibodem en het zuurstofarme grondwater zorgen voor een goede bewaring van het hout dat dateert uit de Romeinse periode. (Vanmoerkerke *et al.*, 2019).





Fig. V150: Een ingedreven paal. De bovenste helft van de paal is vergaan en de bodem vertoont een podzolontwikkeling. In de onderste helft is het hout nog bewaard dankzij het anaeroob milieu (geen zuurstof). Ekeren - het Laar, provincie Antwerpen. (Mikkelsen *et al.*, 2002b).



Fig. V151: Ingedreven tak, volledig verteerd en vervangen door een humusrijke vulling. De wanden rondom de ingedreven tak zijn samengedrukt. Ekeren - het Laar, provincie Antwerpen. (Mikkelsen *et al.*, 2002b).

8. Wortels en paalgaten

In extreme gevallen kunnen vergane wortels dezelfde sporen in de bodem achterlaten als paalgaten (figuren V152-V159).

Het zijn vooral de primaire spilwortels (het verlengde van de stam bijvoorbeeld bij coniferen) die groot genoeg zijn, die kunnen verward worden met paalgaten (figuur V152). Toch kunnen sommige secundaire spilwortels zodanig groot zijn dat ook zij op paalen lijken (figuren V153-V154). (Zie ook §1 Stonken en wortels van bomen, sporen die verdwijnen).



Fig. V152-V153: Spilwortels van den. Kustduinen, Galicië, Spanje.



Fig. V154: Spilwortels van den. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.

Oude wortels kunnen sporen in de bodem achterlaten die enkele millennia zichtbaar kunnen blijven. Vooral in podzolbodems, typisch voor de vele zandbodems van Vlaanderen, kan de morfologie van een verteerde en verdwenen wortel zeer goed lijken op sporen van paalgaten. Dit proces hangt samen met spilwortels die aanwezig waren op een ogenblik dat de podzolbodem zich ontwikkelde. Het lijkt erop dat de diepere zwarte humus- en roestkleurige ijzeraanrijkingshorizonten (Bh en Bs) zich dieper kunnen ontwikkelen langs de afgestorven spilwortels. Na het volledig verteren van de organische stof gaat ook de bovenliggende, licht gekleurde uitlogingshorizont (E-horizont) zich eveneens dieper ontwikkelen ter hoogte van de verdwenen wortel. De instulping van de E-horizont, die de Bh en Bs doorkruist, heeft zo een morfologie die lijkt op een paalspoor (figuren V152-V156, V162-V164).



Fig. V155-V156. Podzolinstulpingen langs oude vergane spilwortels. De bodemontwikkeling heeft plaats gehad na het vergaan van de wortels die waarschijnlijk dateren uit het Laatglaciaal. Fig. V155: Bois de la Houssière, Braine-le-Comte, provincie Henegouwen, België. Fig. V156: Le Châtelet, Lotharingen, provincie Luxemburg, België.



Fig. V157-V159. Palen aangelegd als doorgangstructuur. Fig. V157: Zimbabwe; fig. V158-V159: België.

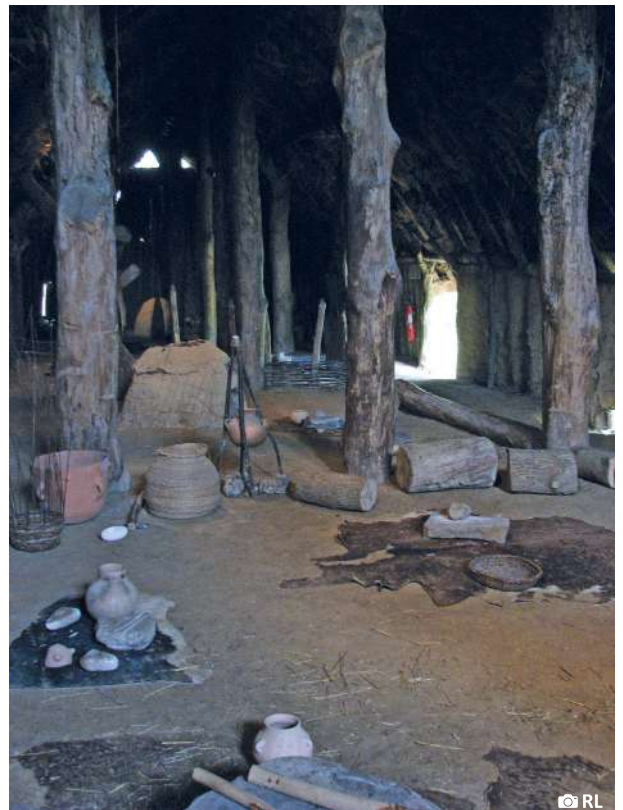


Fig. V160-V161: Palen in archeologische context. Pays de Bray, Frankrijk.

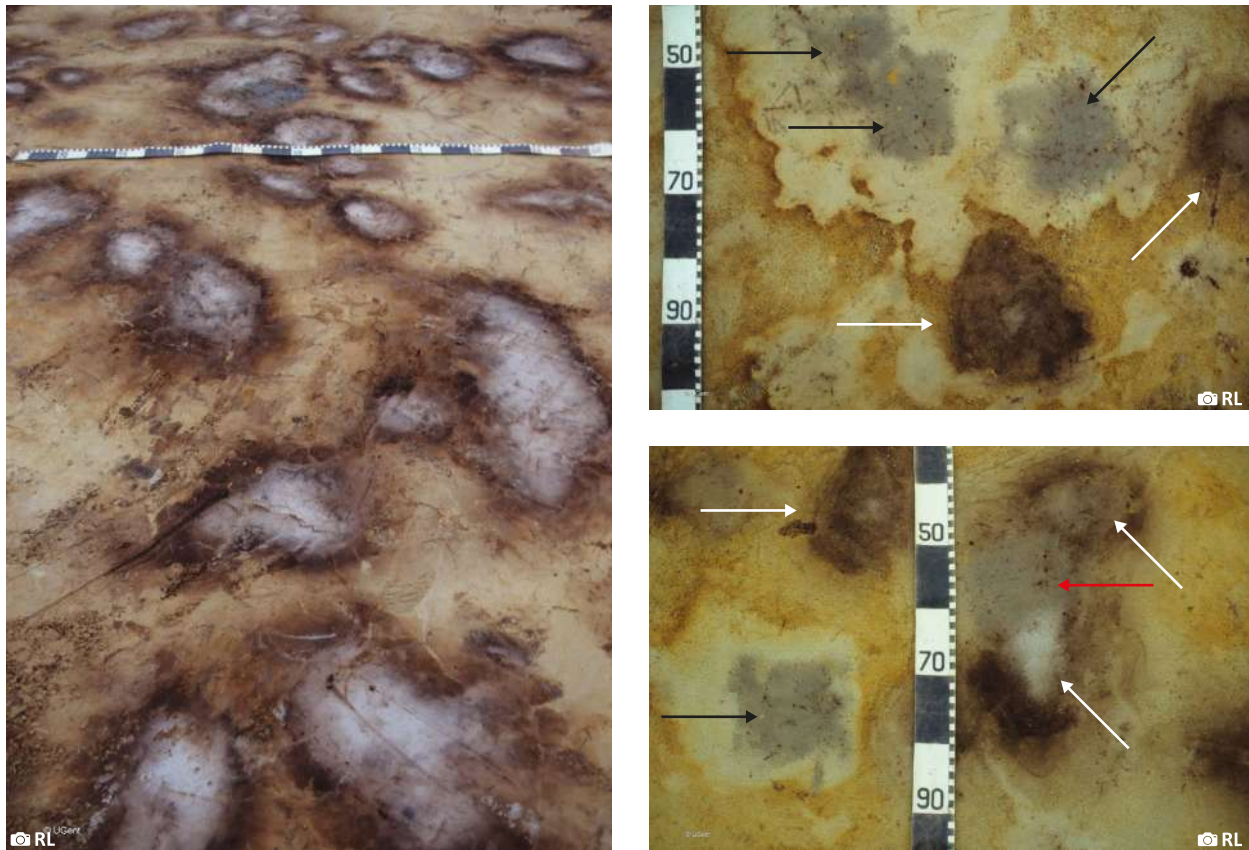


Fig. V162-V164: Horizontaal vlak op een archeologische opgraving te Kemzeke. De zwarte en witte podzolinstulpingen, gevormd langs oude galerijen van spilwortels (witte pijlen) zijn aanwezig naast sporen afkomstig van paalgaten. De paalgaten zijn vandaag gevuld met humusrijke grijze aarde van een vroegere bewerkingshorizont. Sommige paalsporen hebben een ontijzeringsrand wat wijst op plaatselijke reductiecondities door de aanwezigheid *in situ* van een verrottende paal (zwarte pijlen). Andere paalsporen hebben deze rand niet wat erop kan wijzen dat de paal verwijderd werd vooraleer hij kon verrotten (rode pijl). Kemzeke, Oost-Vlaanderen, België (Bourgeois, 1991).

REFERENTIES

- Baes, R. & Langohr, R., 1987. Les sols sur le site de Vin-derhoute-Molenbrug. Chapter III2B1 in Fouilles à Vin-derhoute-Molenbrug, Campagnes 1985-1986. In: *Occu-pation mésolithique, habitat du second âge du fer et de l'époque romaine* (eds. Bourgeois, J., Bungeneers, J., Del-court, A. & Rommelaere, J.). *Scholae Archaeologicae*, 8, 1987, 15-21.
- Bats, M., Crombé, Ph., Devriendt, I., Langohr, R., Mik-kelsen, J.H., Ryssaert, C. & Van de Water, A., 2010. Een vroegmesolithische vindplaats te Haelen-Broekweg (ge-meente Leudal, provincie Limburg). Amersfoort, Archeo-logie in de A73-Zuid. RAM 190, 202 pp.
- Bourgeois, J., 1991. Enclos et nécropole du second âge du fer à Kemzeke (Stekene, Flandre orientale): rapport provi-soire des fouilles 1988. Seminarie voor Archeologie, Rijk-suniversiteit Gent, *Scholae Archaeologicae*, 12, 28 pp.
- Bourgeois, J., Meganck, M., Van Roeyen, J. & Verlaecka, K., 1996. Noodopgravingen 1995 te Sint-Gillis-Waas-Reep-straat (Oost-Vlaanderen): nederzettingssporen uit de late bronstijd, de vroege ijzertijd en de Romeinse periode. *LU-NULA, Archeologia protohistorica*, 4, 29-32.
- Bourgeois, J. & Hageman, B., 1998. Sint-Gillis-Waas (Oost-Vlaanderen) 1997: verder noodonderzoek van de ijzertijd nederzetting. *LUNULA, Archeologia protohistori-ca*, 6, 88-93.
- Bubel, S., 2003. Bioturbation and its effect on the archae-ological record. PhD thesis, Catholic University of Leuven.
- Crombé, Ph., 1996. Epipaleolithicum en Vroeg- en Mid-den-Mesolithicum in zandig Vlaanderen: bijdrage tot de studie van de typo-chronologie en de nederzettingsstruc-tuur. Onuitgegeven doctoraatscriptie, Universiteit Gent.
- Goris, R., 2007. Het grondvlak. *Bosrevue*, 20, apr-mei-jun 2007, 17.
- Inventaire Forestier National, 2011. *La forêt française. 2006-2010*. Les résultats issus des campagnes d'inventaire. IGN, 112 pp.
- Langohr, R., 1993. Types of windthrow, their impact on the environment and their importance for the understanding of archaeological excavation data. *Helinium*, 33,1, 36-49.
- Langohr, R. & Pieters M., 1986. Preliminary data about the soils of the Roman site of the Vake (Maldegem-Belgium). *Scholae Archaeologicae*, 6, 29-39.
- Langohr, R. & Fechner, K., 1993. The digging and filling of Iron Age monument ditches in the sandy area of north-west Belgium: the pedological and palaeo-environmental approach. *LUNULA, Archeologia Protohistorica*, 1, 45-50. ITC-Ghent Publication nr.92/059.
- Langohr, R. & Crombé, Ph., 1999. Valkuilen voor archeo-logen. *Natuurwetenschappelijk Tijdschrift*, 67, 6, 78-85.
- Langohr, R. & Louwagie, G., 2000. Tree sway turbation of soils as observed on archaeological sites in the sandy area of northern Flanders, Belgium. *Pedologie-Themata*, 8, 123-129.
- Langohr, R. & Nicosia C., 2011. Terralba (Oristano). Report of the archeo-pedological prospection, June-July 2010, 49 pp.
- Louwagie, G. & Langohr, R. 2005. Pedo-lithostratigraph-ical analysis. In: *The Last Hunter-Gatherer-Fishermen in Sandy Flanders (NW-Belgium). The Verrebroek and Doel Excavation Projects. Volume 1: Palaeo-environment, chronology and features* (Ed. Crombé, Ph.), 27-107. Archaeological Reports Ghent University 3, 334 pp.
- Mikkelsen, J., Langohr, R. & Vanwesenbeeck, V., 2002a. Bodemkundig onderzoek op de archeologische site Brecht Moordenaarsven, provincie Antwerpen, België. Archae-ologisch onderzoek van het HSL-traject Antwerpen- Ne-derlandse grens, Provinciebestuur van Antwerpen. Ar-cheo-Bodemkundig rapport nr. 5, 25 pp.
- Mikkelsen, J., Langohr, R. & Vanwesenbeeck, V., 2002b. Bodemkundig onderzoek op de archeologische site Eke-ren Het Laar, provincie Antwerpen, België. Archaeologisch onderzoek van het HSL-traject Antwerpen- Nederlandse grens, Provinciebestuur van Antwerpen. Ar-cheo-Bodemkundig rapport nr. 1, 120 pp.
- Mikkelsen, J., Langohr, R., Boas, N. & Macphail, R., 2006. Land use and environmental degradation in bronze age settlements, Eastern Jutland, Denmark. Proceedings from the VIII Nordic conference on the applications of scientific methods in archaeology, Umea 2001, 81-92.
- Mikkelsen, J., Langohr, R. & Macphail R., 2007. Soilscape and land-use evolution related to drift sand movements since the bronze age in Eastern Jutland, Denmark. *Geoar-chaeology*, 22, 2, 155-179.
- Pieters, M. & Langohr, R., 1988. Soil survey of the roman site of the Vake (Maldegem, Belgium). *Scholae Archaeo-logicae*, 9, 37-54.
- Troedsson, T. & Lyford, W.H., 1973. Biological disturbance and small-scale spatial variations in a forested soil near Garpenberg, Sweden. *Studia Forestalia Suecica*, 109, 22 pp.
- Van Hemelrijck, I., Muys, B. & De Vos, B., 2004. Hoge bomen vangen veel wind: verklaringen voor windworp van beuk in het Zoniënwood. *Bosrevue*, 8, 1-4.
- Vanmoerkerke, J., Tegel, W. & Laurelut, C., 2019. Les faux poteaux plantés. In: *Soils as records of past and present. From soil surveys to archaeological sites: research stra-tegies for interpreting soil characteristics* (eds. Deák, J., Ampe, C. & Mikkelsen, J.), 113-119. Proceedings of the Geoarchaeological Meeting, Bruges (Belgium), 6 & 7 No-vember 2019. Raakvlak, Bruges, 319 pp.

IN DIALOOG MET BODEMS VELDBODEMKUNDE VOOR ARCHEOLOGISCH ONDERZOEK

EROSIE EN SEDIMENTATIE



AUTEURS : ROGER LANGOHR
CAROLE AMPE
JARI HINSCH MIKKELSEN

1. Inleiding

Erosie is een proces waarbij bodemdeeltjes worden losgemaakt en getransporteerd door zwaartekracht, water, wind, zee en ijs. Na het transport worden de deeltjes afgezet: het verlies van materiaal door erosie op de ene plaats gaat dus steeds gepaard met afzetting op een andere plaats, dit kan van enkele meters tot honderden kilometers verder zijn zoals in een rivier, een meer of een zee.

Om de dynamiek en de evolutie van het bodemlandschap in zijn geheel te begrijpen, bespreken we in de volgende paragrafen drie fundamentele processen: erosie, transportwijze en afzetting van de sedimenten.

1.1. Geologische en versnelde erosie

In 1951 stelde de Soil Survey Manual van de US Department of Agriculture (Soil Survey Staff, 1951: 251-253) voor om een onderscheid te maken tussen geologische erosie en versnelde erosie. Na deze publicatie volgden andere handboeken deze benadering (bijvoorbeeld FAO, 1965: 22). De geologische erosie of 'natuurlijke erosie', is de evolutie van de topografie zonder menselijke tussenkomst, de versnelde erosie hangt samen met verstoringen in het landschap door de mens. Enkele voorbeelden van geologische erosie zijn het transport door gletsjers wat resulteert in het vormen van morene-afzettingen, het loskomen, vallen en afzetten van rotsfragmenten aan de voet van steile hellingen, riviererosie en kusterosie en winderosie met duinvorming (figuren E1-E4, E94-E95). Het onderscheid tussen geologische en versnelde erosie is erg belangrijk bij het onderzoek van het paleomilieu en vooral als het gaat om archeologisch onderzoek.



Fig. E1-E4: Geologische of natuurlijke erosie.

Fig. E1: Glaciale erosie en morene afzettingen langs de Athabasca gletsjer. Provincie Alberta, Canada.

Fig. E2: Rivererosie en sedimentatie langs de North Thompson rivier met erosie in de buitenbocht en sedimentatie in de binnenbocht van de meander. British Columbia, Canada.

Fig. E3: Kusterosie met een verglijding. Houns-Tout, Chapman's Pool, Dorset, Verenigd Koninkrijk.

Fig. E4: Winderosie in de panne en sedimentatie aan de kop van het paraboolduin. Råbjerg Mile, Skagen, Denemarken.

Er zijn gebieden waar geologische erosie niet of bijna niet aanwezig is. Dit zijn meestal zones met een permanente vegetatiebedekking gedurende het hele jaar en met hellingen die niet steiler zijn dan enkele graden (Selby, 2005: 268; Campy & Macaire, 2003: 165). De hellingsgraad vanaf wanneer erosie kan gebeuren, is afhankelijk van de grondsoort en het klimaat. In gematigde en vochtige continentale klimaten zijn er goed bewaarde archeologische structuren aangetroffen op hellingen tot ongeveer 30 graden (van Beek *et al.*, 2008: 21). Dit wil zeggen dat sinds enkele millennia deze hellingen stabiel zijn. Al deze sites zijn begroeid met bos of kruidachtige vegetatie en werden nooit overgeëxploiteerd of overbegraasd. Verder zijn ze gelegen op diepe leem- tot zandige leembodems met een hoge porositeit (figuren E5-E7, E40-E43, E118, E119, E140-E146, E176, E177). Voor Vlaanderen kunnen we veronderstellen, dat onder een continu en permanent plantendek, de afgelopen 10.000 jaar zeer weinig of geen geologische erosie en sedimentatie heeft plaatsgevonden. Uitzonderingen hierop zijn

de bodems gelegen langs beken en rivieren en in de kuststreek (figuren E85-E93, E201-E203). In de periode voorafgaand aan het Holoceen, tijdens de Dryas perioden, en in het bijzonder tijdens de Jonge Dryas (11.650 – 12.850 BP), een periode met een zeer uitgesproken periglaciaal klimaat, vond er wel belangrijke geologische erosie plaats, zeker in de zandstreek van Vlaanderen. Het vegetatiedek en de bodems ontwikkeld in de pleniglaciaal dekkzanden hadden hier sterk te lijden tijdens de vorstperiode. Door de aantasting van het beschermende vegetatiedek nam de kans op winderosie en sedimentatie erg toe. In de leemstreek beperkte de erosie zich in die periode voornamelijk tot de valleibodems (Langohr & Sanders, 1985a) waar stromend smeltwater van het sneeuwdek de topografie plaatselijk sterk beïnvloedde. De rest van het onverstoorde lössgebied dat tot op vandaag permanent onder bos is gebleven, vertoont nauwelijks erosie. Deze bodems hebben kenmerken die teruggaan tot de aanvang van de bodemevolutie in het begin van het Laatglaciaal (Langohr, 2009a).

Geologische of versnelde erosie. Topografie en bodemtypes van het Zoniënwoud (leemstreek), Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België (figuren E5-E9)

In een uitgestrekt deel van het Zoniënwoud is er sedert het begin van de bodemgenese, ongeveer 15.000 jaar geleden (begin Laatglaciaal), nooit aan landbouw gedaan en heeft er nooit versnelde erosie plaatsgevonden. Het Zoniënwoud kan dus als referentie dienen voor ongestoorde bodemprofielen en toont aan dat alle erosie in de leemstreek direct of indirect toe te schrijven is aan menselijke activiteiten. Ook in het Holoceen vond er in het overgrote deel van het Belgische bodemlandschap geen bodemerosie plaats totdat bosontginning in functie van de landbouw begon.



Fig. E5: Een natuurlijk ravijn ontstaan door sterk geconcentreerde waterafvloei, waarschijnlijk te wijten aan een periode met diepe vries/dooi cycli en het dooien van sneeuw in de lente. Zulke omstandigheden waren typisch voor de Jonge Dryas periode. Vandaag, en waarschijnlijk gedurende heel het Holoceen, stroomt/stroomde hier geen water. Deze natuurlijke ravijnen bevinden zich in het laagste deel van het landschap. De foto is genomen tijdens de zomer. Het continue bladerdek (strootiellaag) toont aan dat er geen afstroming heeft plaats gevonden sedert de laatste periode van bladaccumulatie (november van het jaar ervoor), zelfs op hellingen van 30° (helling van stabiliteit). Deze ravijnerosie is dus een landschapsrelict.

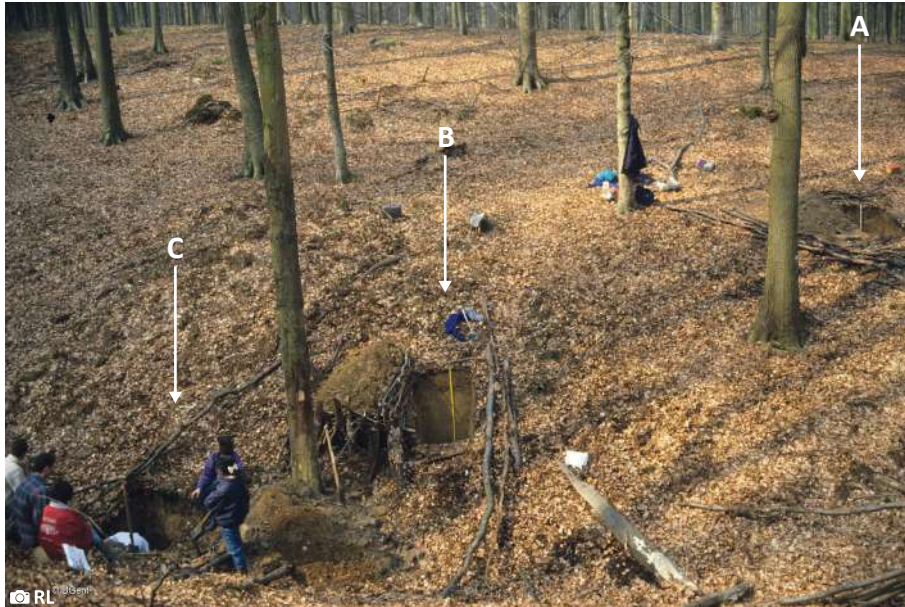


Fig. E6: Studie van een topotranssect op een zuidgerichte helling van een ravijn/vallei. Profiel A bevindt zich op het bovenste deel van de helling, profiel B op het onderste deel en profiel C op de vallei-bodem.



Fig. E7: Detail van profiel B (zie fig. E6). Onder de strooisellaag (H1: Oa) is er een humusrijke A-horizont (H2: Ah) van enkele centimeters dik. Zo'n horizont wijst op een stabiele situatie gedurende minstens een eeuw. H3: biologisch actieve horizont (vooral wortelactiviteit) (B β) typisch voor deze onverstoorde leembodems onder bos. H4: klei-aanrijkingshorizont (Bt1) met klei-uitlogingstongen. H5: klei-aanrijkingshorizont (Bt2). (Sanders *et al.*, 1985).



Fig. E8: Recente erosie in de bodem van een ravijn. Het water komt niet van de helling die bedekt is met een strooisellaag, maar is afkomstig van hogerop in de vallei waar een verharde weg wordt gedraineerd.

Fig. E9: Voorbeeld van een verharde weg. Wegen concentreren en draineren heel veel water dat afvloeit naar de depressies en waar het erosie veroorzaakt. (Blankedelleweg, Zoniënwood, Oudergem, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België).



Onder het Belgische klimaat, vochtig en gematigd, beschermde de vegetatie de bodem tegen erosie. We kunnen aannemen dat antropogene erosie begon ten tijde van het neolithicum. Vanaf dan vernietigde de mens de bodembedekking met een bijl of door middel van vuur met het oog op de jacht of de veeteelt. Nog ingrijpender was het verwijderen van vegetatie en aansluitend de bewerking van de grond om gewassen te telen. Waar het beschermende vegetatiedek beschadigd was, zoals op bewoningssites en langs wegen (figuren E10-E14) kon erosie door wind en neerslag de bodems aantasten. Toch kunnen we aan de hand van vele studies van bodems op prehistorische sites in de leemstreek vaststellen dat tot en met de ijzertijd deze erosieprocessen eerder lokaal voorkwamen in zones rond de nederzettingen (Fechner *et al.*, 2014). Er zijn enkele gevallen gekend van erosie vanaf het neolithicum, maar vermoedelijk was dit beperkt, omdat de oppervlakkige bodemhorizonten in die periode nog veel organische stof bevatten, een belangrijke factor in bodemstabilisatie. Na de oogst was de akker

waarschijnlijk vrij snel terug goed beschermd door de groei van onkruid (zie kader 'Ploegen, onkruid en braaklegging van de grond'). Bovendien was de bodembewerking, eerst met een hak, later met een haakploeg, eerder ondiep: vermoedelijk amper 5 cm diep in de bronstijd en een 10-tal cm in de Romeinse periode (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1992: 106). Erosie in die perioden had evenwel zeker plaats op de bewoningssites en de wegen ernaartoe (figuren E10-E14). Ook groeven voor leem en zandsteen waren sites waar erosie lokaal een belangrijke rol speelde. Er zijn echter geen aanwijzingen om aan te nemen dat er erosie op alle akkers van die periodes plaatsvond.

In de volgende paragrafen beperken we ons tot aspecten van erosie en sedimentatie die belangrijk zijn voor het begrijpen van de evolutie van het bodemlandschap en de interpretatie van archeologische opgravingen in Vlaanderen.

Erosie gelinkt aan bewoningssites (figuren E10-E14)



Fig. E10: Reconstructie van een vroegneolithisch huis. De bodem rond het huis is volledig kaal.



Fig. E11: Grondontginning voor muurconstructie en het bakken van dakpannen rond een huis. Cajamarca, Altiplano, Peru. (Dupouey *et al.*, 2002).



Fig. E12-E13: Dierenperken rond het huis zijn bronnen van erosie. Deze percelen zijn aangerijkt met mest en urine waardoor het fosfor- en stikstofgehalte hoog kan oplopen. Aangezien fosfor moeilijk uitlooft, kan zo'n plaats eeuwen later nog opgespoord worden door het fosforgehalte in het laboratorium te bepalen. Fig. 12: Heverlee, provincie Vlaams-Brabant, België; fig. E13: Corsica, Frankrijk.



Fig. E14: In de sterk betreden zone rond recente boerderijen kan nog steeds erosie optreden. Dijon, departement Côte-d'Or, Frankrijk.

1.2. Belang van erosie en sedimentatie op archeologische sites

Elke aardkundige of veldarcheoloog werkzaam op een archeologische site, wordt vroeg of laat geconfronteerd met de gevolgen van erosie en sedimentatie, zowel actuele/moderne als (pre)historische erosie. Voor het behoud van archeologische sporen heeft erosie een zeer negatief en soms zelfs catastrofaal gevolg. Een voorbeeld zijn paalgatsporen: als een paal oorspronkelijk 60 cm diep onder het maai-veld werd ingegraven, blijft er met een ploeglaag van 30 cm dik alleen nog de onderste 30 cm van de structuur over. Indien er door het eeuwenlang ploegen, 30 cm van de bodem is geërodeerd, dan zijn deze sporen vandaag volledig verdwenen, omdat ze opgenomen zijn in de nieuwe ploeglaag. Zelfs in het geval van minder uitgesproken erosie, bijvoorbeeld 10 tot 20 cm, is het mogelijk dat de paalgatstructuren niet meer te zien zijn. De bioturbatie door graverende dieren zoals regenwormen en mollen is immers het meest intens in de bovenste horizonten. Naarmate het bodemoppervlak daalt, zal de zone van bioturbatie eveneens meezakken en de structuren aantasten. De kans is dan ook groot dat er van deze sporen niet veel meer is overgebleven.

In tegenstelling tot erosie kan een archeologische site ook bedekt worden met sedimenten (colluvium, nivellering, constructie van wallen, *tumuli*...). Zo'n site is dan extra beschermd tegen erosie, wat het behoud van archeologische structuren en referentieprofielen bevordert (zie thema 'Voorbereiden en uitvoeren van aardkundig onderzoek') (figuren E89, E134, E190, E194, E196, E198, E203). Afhankelijk van de positie in het landschap is het eveneens mogelijk dat de sedimenten een oppervlak bedekken dat eerder al geërodeerd was (Mikkelsen & Langohr, 1996) (figuren E194, E199, E200). In dit geval kan aardkundig onderzoek bijdragen tot inzicht in de complexe evolutie van het bodemlandschap op een archeologische site.

Gerichte observaties tijdens een archeologische opgraving van de morfologie, de vulling en de omgeving van de uitgegraven structuren, leveren cruciale informatie over het menselijk gedrag (figuren E15-E31, E50-E55, E150-E154, E164-E169), de morfologie van de oorspronkelijke structuren en de latere evolutie van de vulling (figuren E44-E49, E96-E99). De bijdrage van de aardkunde is essentieel in dit aspect van het archeologisch onderzoek (bijvoorbeeld Fechner & Langohr, 1993; Langohr & Fechner, 1993; Fechner, 2000; Langohr, 2000; Hutchinson & Stuart, 2003).

Onderzoek van de omgeving van een archeologische site en de archeologische structuren zelf leveren informatie over het menselijk gedrag. Het graven en vullen van een gracht - Aalter-Woestijne, provincie Oost-Vlaanderen, België (figuren E15-E20)



Fig. E15-E17: Luchtfoto en vogelzicht van de opgravingsoppervlakte van een La Tène gracht, ontsluiting is 30 m op 50 m groot (Bourgeois, 1990; Bourgeois & Rommelaere, 1991).

Fig. E15: De rechthoekige structuur, aangelegd op het hogere deel van het landschap, is later geërodeerd (lichtgeel-beige kleur).

Fig. E16: De site bevindt zich ter hoogte van een parabool-duinrug die later (in de middeleeuwen?) intentioneel sterk genivelleerd is.

Fig. E17: 25 coupes werden uitgegraven ter hoogte van de perfect rechthoekige grachtstructuur die 26 m op 45 m groot is.

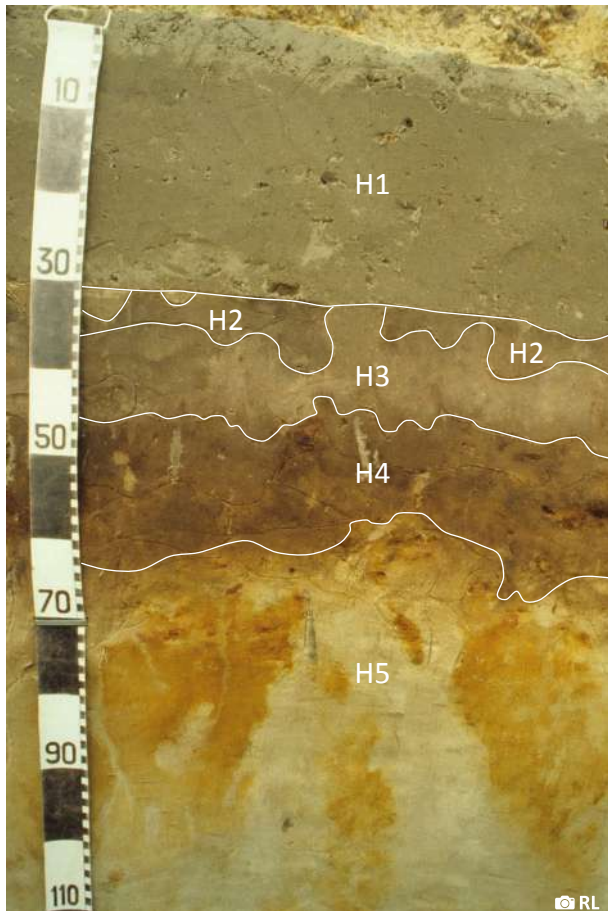


Fig. E18: Het referentieprofiel op de site van Aalter-Woestijne is een begraven humus-ijzerpodzol. H1: $\wedge$ Ap; ploeglaag ontwikkeld in nivelleringsaarde. H2: Ab; zwakke sporen van de originele humusrijke oppervlaktehorizont. H3: Eb; zwakke sporen van de ijzer-humus uitlogingshorizont. H4: Bhsb; humus-ijzer aanrijkhingshorizont. H5: Blb; sterk gevlekte horizont met roestvlekken door de fluctuerende grondwatertafel.

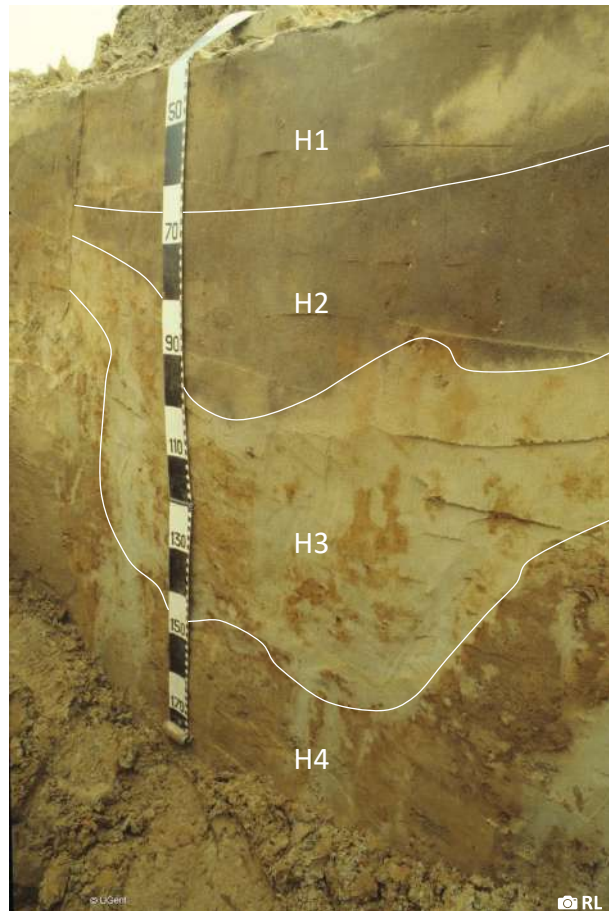
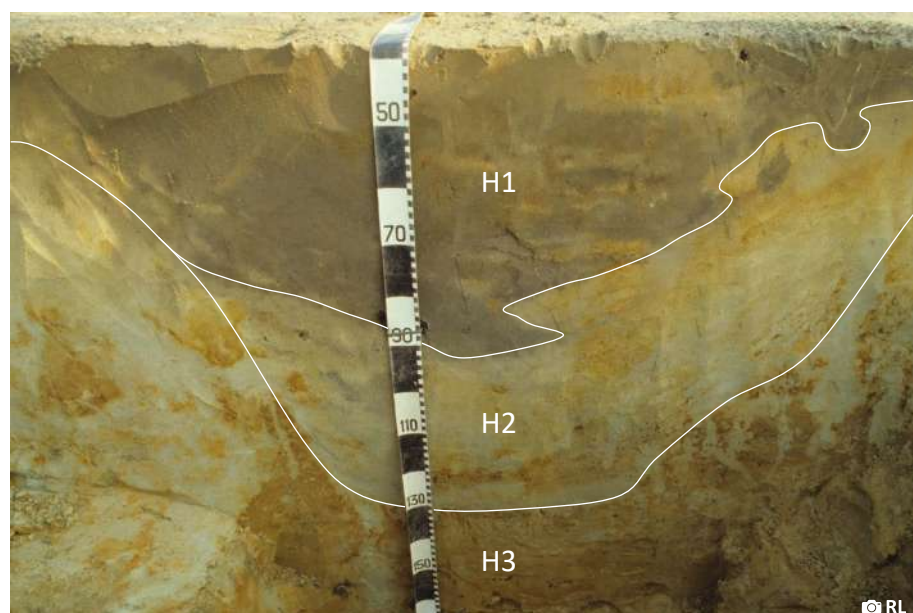


Fig. E19: Bodemprofiel van de grachtvulling: H1: opvullingslaag van de gracht; H2: 65-70/90 cm donkere aarde met fragmenten van podzol B-horizont materiaal; H3: 70/90-80/140 cm: licht gekleurde grachtvulling met roestvlekken. De grens tussen H2 en H3 vertoont instulpingen maar is zeer abrupt. De schuine zijwand van de gracht tussen H3 en H4 vertoont geen sporen van verbrokkeling. H4 maakt deel uit van de *in situ* bodem.

Fig. E20: De vlakke bodem van de gracht vertoont geen sporen van gestratificeerd sediment, iets wat men nochtans zou kunnen verwachten wanneer het geregend heeft in de periode dat de gracht openlag. De asymmetrie van de vulling wijst op een vulling vanaf de linkerkant met donkere aarde (H1) (buitenkant van de structuur) en vanaf rechterzijde met lichter gekleurde en meer heterogene aarde (H2) (binnenkant structuur). De schuine zijwand van de gracht (grens H2 en H3) vertoont geen sporen van verbrokkeling.



Het graven en vullen van een gracht (figuren E21-E25)



Fig. E21-E22: Twee grachtvullingen. De grens tussen de donkere en de blekere vulling is abrupt en vertoont een asymmetrie met donkere aarde afkomstig van de buitenzijde van de gracht en blekere aarde van de binnenzijde van de gracht. Op de grens van beide vullingen zijn er sporen van een 20-30 cm dikke laag van samengedrukte aarde (pijlen). De zwarte sporen zijn resten van konijnenpijpen die nu gevuld zijn met zwarte aarde, afkomstig van een vergane wortelmassa en van de verbrokkelde galerijwand. Aalter-Woestijne, provincie Oost-Vlaanderen België.

Interpretatie: De rechthoekige gracht (zie fig. E15) werd nauwgezet uitgegraven en enkele weken later met zorg terug gevuld. Bij het graven werd de aarde van de bovenste donkere bodemhorizonten (tot onderzijde van de Bhs-horizont van de podzol) aan de buitenzijde van de gracht gedeponneerd. De lichter gekleurde aarde met roestvlekken van de diepere horizonten werd aan de binnenzijde van de gracht gelegd. Kort nadien werd de gracht terug opgevuld met de blekere aarde terug onderaan en de donkere aarde bovenaan. Na het storten van de blekere aarde, heeft men deze eerst samengedrukt vooraleer de gracht verder op te vullen met de donkere aarde (laag aangeduid met de witte pijlen). De bodem van de gracht is horizontaal, waarschijnlijk om te vermijden dat men bij het dieper graven binnen het bereik van de grondwatertafel zou komen. De diepte van de gracht geeft aan hoe diep de watertafel stond op het ogenblik dat de structuur openlag, waarschijnlijk op het einde van de zomer of in de herfst. De afwezigheid van sporen van verbrokkelen en instorten van de zijwanden van de gracht wijst erop dat de gracht al gedicht was alvorens het grondwater opnieuw steeg. De afwezigheid van gestratificeerde sedimenten op de grachtbodem toont aan dat het niet heeft geregend in de periode dat de gracht openlag. Bij het archeobodemkundig onderzoek houdt men rekening met zowel de aan- als afwezigheid van bepaalde bodemkenmerken. (Langohr & Fechner, 1993).

400 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek



Fig. E23-E25: Gelijkaardige manier van grachtvulling op de ijzertijdsite van Ursel-Rozestraat (zie Aalter-Woestijne, fig. E21-E22), provincie Oost-Vlaanderen België. (Bourgeois, 1998)



Graven en vullen van een gracht (figuren E26-E31)

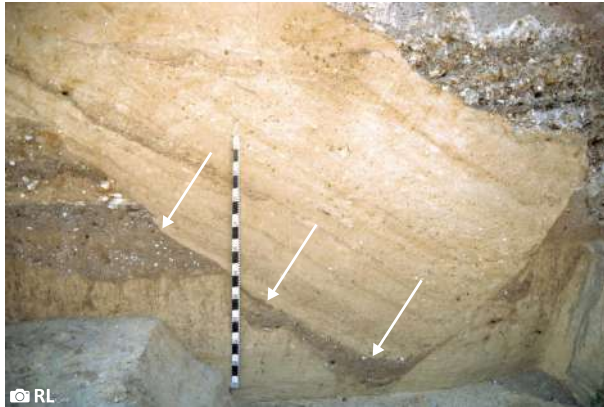


Fig. E26-E27 (detail): Droge gracht met V-vormig profiel behorend tot de verdedigingslinies van het 14de eeuwse Parijs. Deze gracht is onmiddellijk na het uitgraven terug opgevuld. De sedimenten die de gracht hebben gedicht, zijn van links aangebracht en zijn duidelijk gelaagd. Ze komen uit de plaatselijke ondergrond, meer bepaald uit de zone van kalkrijke leem. Louvre, Parijs, Frankrijk.

De argumenten voor het onmiddellijk heropvullen zijn vooral gesteund op de afwezigheid van een reeks kenmerken: a) geen gestratificeerde sedimenten op de bodem van de gracht (pijlen), wat er op wijst dat het niet geregend heeft tussen het uitgraven en heropvullen van de gracht; b) geen humusrijke horizont op de grachtwand wat betekent dat er geen tijd was voor een vegetatieontwikkeling; c) geen sporen van faunagangen die vanaf de grachtwand beginnen; d) geen sporen van vorst, zoals een plaatstructuur in de grachtwand. Dit voorbeeld toont aan dat milieureconstructie op zowel de aan- als de afwezigheid van bepaalde kenmerken steunt. Hiervoor gebruikt men controlelijsten (En.: *checklist*) die opgesteld werden aan de hand van talrijke bodemonderzoeken op archeologische sites. (bijvoorbeeld Fechner & Langohr, 1993; Fechner *et al.*, 2004).



Fig. E28-E29: Een gracht met sporen van begroeiing en fauna-activiteit. Fig. E29: Detail van de grachtwand met een zwarte humusrijke horizont en sporen van wortels en fauna-activiteit in de originele profielwand en doorheen de afgezette lagen in de gracht. Opgraving te Verrebroek, Beveren, provincie Oost-Vlaanderen, België.

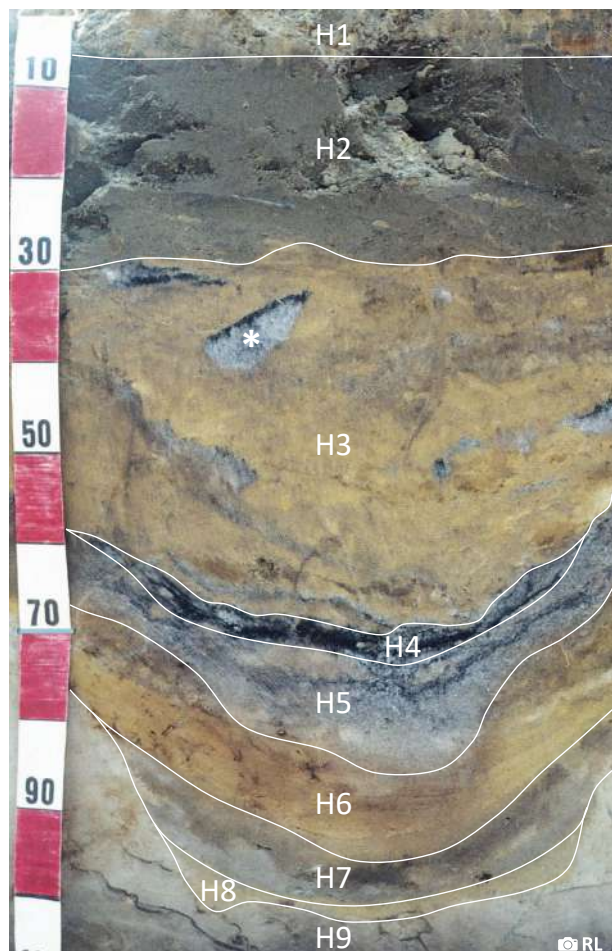


Fig. E30: Een gracht opgevuld in drie fasen. Na het graven van de gracht (H3-H8), werd deze in een eerste fase onderaan opgevuld met zandig materiaal (H7-H8). In dit materiaal vormde zich een met humus aangerijkte oppervlaktehorizont (H7: Ab) met eronder een dunne Cb-horizont (H8) en het zandig moeder materiaal (H9: C).

In een tweede fase werd de gracht opgevuld met stuifzand (H4-H6). In deze zanden is een podzolbodem ontwikkeld met van boven naar onder een humusrijke horizont (H4: Ahb), een grijze uitlogingshorizont (H5: Eb) en een humus-ijzeraanrijkingshorizont (H6: Bhb).

In een derde fase werd de gracht opgevuld (H3: ^C) met materiaal dat vergelijkbaar is met dat van H6 maar het bevat fragmenten van de podzol A- en E-horizont (*). In de derde fase is de bodem genivelleerd en opgehoogd en onder landbouw gebracht (H1-H2: ^A, ^Ap). De horizonstsymbolen zijn uitgelegd in Mikkelsen *et al.*, 2022.

De ontwikkeling van een podzolbodem (tweede fase) wijst op een lange stabiele periode waarbij de bodem aan de oppervlakte lag. Later is de gracht gedeeltelijk gevuld met plaggen. Aalter-Woestijne, provincie Oost-Vlaanderen, België.

1.3. Kartering

Een goede kartering van de actuele en de vroegere erosie/sedimentatieprocessen op een archeologische site en de omgeving sinds de bestudeerde bewoningsperiode, verhoogt de betrouwbaarheid



Fig. E31: Voorbeeld van een gracht met dicht begroeide stabiele oevers en fauna-activiteit. Polder, Koksijde, provincie West-Vlaanderen, België.

van archeologische studies aanzienlijk (bijvoorbeeld Langohr & Sanders, 1985a; Pieters, 1986). Het is duidelijk dat enkele puntobservaties ontoereikend zijn om uitspraken te kunnen doen voor de hele site.

1.4. Bodemreferentieprofielen

Om de graad van erosie en sedimentatie te beoordelen, vergelijken bodemkundigen de bodems van de site met de referentieprofielen. Dit zijn profielen in de nabije omgeving van de archeologische site, die zo weinig mogelijk zijn geërodeerd. Het onderzoek van referentieprofielen gebeurt bij voorkeur tijdens de opgraving, waarbij gebruik wordt gemaakt van:

1. Een gedetailleerde topografische kaart die opge maakt wordt vóór de opgravingen. Hiervoor gebruik je best LiDAR beelden (zie kader 'LiDAR'). Het maximale interval tussen de hoogtelijnen zal uiteraard afhangen van de configuratie van het landschap, maar in het algemeen zal dit in de orde van 10 tot 25 cm zijn.
2. Het lokaliseren van bodems in de onmiddellijke omgeving van de bestudeerde archeologische structuren die informatie kunnen geven over het originele bodemlandschap d.w.z. zonder of met zo weinig mogelijk menselijke impact. Referentieprofielen kunnen dus ook goed bewaard zijn, omdat ze onder sedimenten begraven liggen (figuren E89, E134, E190, E194, E196, E198, E203).

LiDAR

LIDAR of '*Light Detection And Ranging*' is een techniek die met een zeer grote nauwkeurigheid het reliëf van een site kan weergeven. De site wordt afgetast met een laser geïnstalleerd op een vliegtuig. Het toestel kan per seconde de hoogte van 20.000 tot 100.000 punten opmeten. In beboste gebieden overloopt het niet alleen de toppen van bomen, maar geeft het een nauwkeurig beeld van het onderliggend bodemoppervlak. De precisie is zodanig dat men minimale hoogteverschillen kan detecteren die zelfs met het blote oog nauwelijks zichtbaar zijn (Langohr & Nicosia, 2015: 23, 29). LiDAR is een essentieel hulpmiddel geworden tijdens archeologisch onderzoek (Meylemans & Peermans, 2017).

2. Menselijke activiteiten die erosie kunnen veroorzaken

2.1. Erosie door menselijke activiteiten op landschapsniveau

Zoals eerder vermeld beschermt de vegetatie, of het nu gaat om bos, grasland, toendra of steppe, de bodem tegen de meeste vormen van erosie. Zolang de mens jager-verzamelaar was, bleef zijn impact op de vegetatiebedekking zeer beperkt, tenzij hij voor de jacht vuur gebruikte. Direct na de brand was er een periode dat de grond kaal bleef, wat erosie door wind en water mogelijk maakte. Daarna kon de vegetatie zich herstellen. Experimenten hebben echter aangetoond dat na een brand, de bodems een waterafstotende (hydrofobe) oppervlaktehorizont kunnen ontwikkelen (DeBano, 2000), wat erosie kan versterken.

Vanaf het moment dat de mens in meer permanente nederzettingen leefde, is zijn invloed op de vegetatie sterk toegenomen. Er zijn minstens vier soorten activiteiten die, direct of indirect, de vegetatie aantasten.

- Op en rond de meer permanente bewoningslocaties ontwikkelt er zich een netwerk van wegjes en zones van intensief gebruikte passages. Hierdoor wordt de bodem sterk verdicht, met als gevolg het volledig verdwijnen van vegetatie (figuren E10-E14).
- Paden en andere doorgangen, zoals voor vee, krijgen een permanent karakter. De vegetatie verdwijnt, zelfs onder bos (figuren E32-E37).
- Bij het bewerken van de grond, of het nu gaat om een hak, haakploeg, spade of ploeg, blijft de grond één of meerdere perioden van het jaar volledig kaal.
- Onder weiland is de bodem zeer goed beschermd, maar overbegrazing en vertrappeling kan leiden tot het verdwijnen van de vegetatie (figuren E35-E37, E123, E175) (zie thema 'Bodembioturbatie door dieren').

Erosie langs paden (figuren E32-E39)



Fig. E32-E33: Bij de doortocht van het vee kan er een pad ontstaan. Hierlangs kan erosie optreden, zelfs in het bos.



Fig. E34: Een deel van deze paden wordt gevolgd door wandelaars.



Fig. E35: Erosie langs een pad in grasland.



Fig. E36: Betreding door vee op een helling kan relatief grote oppervlakten innemen.



Fig. E37: Lokaal kan deze geulerosie evolueren tot ravijnerosie. Fig. E32-E37: Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.

Fig. E38: Ook de mens veroorzaakt erosie: op druk bezochte recreatiezones treedt er erosie op door betreding. Omgeving van de 'Verdronken kinderen' in het Zoniënwood. Watermaal-Bosvoorde, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België.



Fig. E39: Glijbanen rond Rood Klooster, in het Zoniënwood. Oudergem, Tervuren, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België.

Wanneer de bodem niet langer wordt beschermd door de vegetatie, is er ook nog de organische stof van de oppervlaktehorizont die in zekere mate bescherming biedt tegen erosie door wind en water. Humus, zeer fijn organisch materiaal geproduceerd door de microbiologische activiteit van bacteriën en schimmels, is in staat om de minerale deeltjes van de bodem bij elkaar te houden. Dit wordt de structurele 'stabiliteit' van de bodem genoemd (zie kader 'Humus en structurele stabiliteit van de bodem') (figuur E83).

Humus en structurele stabiliteit van de bodem

Een heel eenvoudig experiment illustreert het belang van organische stof in een bodem om deze te beschermen tegen regenerosie.

1. Neem in een bodemprofiel een monster van de oppervlaktehorizont rijk aan humus (A) en een monster van een diepere horizont met dezelfde korrelgrootte maar arm aan humus (B).
2. Zorg ervoor dat beide monsters luchtdroog zijn, zoals het geval is wanneer geploegde grond wordt blootgesteld aan wind en zon.
3. Plaats vervolgens fragmenten van deze monsters in een bak gevuld met water. Fragment A blijft zeer lang stabiel, terwijl fragment B onmiddellijk afbrokkelt en in een paar minuten een massa modder wordt.

Verklaring: De eerste horizont, rijk aan humus, heeft aggregaten met een hoge structurele stabiliteit. Het fijne organisch materiaal werkt als een lijm die de gronddeeltjes bij elkaar houdt. De fragmenten van de diepere horizont arm aan organische stof, bezitten een zeer lage structurele stabiliteit. Een bodem met veel organische stof zal dus meer weerstand bieden tegen erosie. Daarom is het belangrijk om het organische stofgehalte van de oppervlaktehorizont zo hoog mogelijk te houden. Het gehalte aan klei, ijzer- en calciumkationen wordt ook als gunstig beschouwd voor de structurele stabiliteit, maar hun impact is duidelijk lager dan die van organische stof.

Ploegen kan humusarm bodemmateriaal uit de diepere bodemhorizonten naar het oppervlak brengen. Door meerdere opeenvolgende horizonten te vermengen, vermindert de concentratie van organische stof en daarmee ook de structurele bodemstabiliteit. Vandaar een groter risico op bodemerosie. Hoe dieper het ploegen, hoe groter de verdunning van het organisch materiaal. In de loop van de tijd is

de ploegdiepte alleen maar groter geworden. Zo bewerkte men met een haakploeg tijdens de bronstijd de bodem tot een diepte van ongeveer 5 cm. De bewerkingsdiepte steeg tot ongeveer 10 cm wanneer de ploeg werd voortgetrokken door ossen zoals in de Romeinse tijd. In de 12de eeuw bereikte de door paarden getrokken ploeg een diepte tot 18 cm (Van Vliet *et al.*, 1992: 106). Sinds de Tweede Wereldoorlog is, met steeds krachtigere tractoren, ploegen tot 30 cm diep de standaard geworden (figuren E18, E30, E50, E92, E99, E131, E134, E153, E154, E165, E179, E185-E188, E198, E199).

Natuurlijk bos of weiland, in tegenstelling tot akkerland, beschermt de oppervlaktehorizont tegen zon en wind. De bodem van een akker zal in de zomer aanzienlijk hogere temperaturen bereiken en meer uitdrogen dan een bodem onder bos of weiland. Bovendien zal de bodem tijdens regenperiodes sneller verzadigd zijn met water en in de winter zal de vorst dieper in de bodem dringen dan onder bos. Niet enkel het ploegen van de bodem, maar ook het bemesten ervan heeft een impact op vooral het bovenste deel van de bodem. Bemesting kan een grote impact hebben op de fauna en de microbiologische activiteit van de bodem. Veel organismen die in de strooisellagen en de A-horizont van het bos leven, verdwijnen van de ene op de andere dag. Aan de andere kant, dankzij beluchting en toevoeging van meststoffen, worden bepaalde micro-organismen gestimuleerd die een niet onbelangrijke fractie van de organische stof consumeren die stabiel was in het bos. Het eindresultaat is wederom een afname van het organische stofgehalte en daarmee een lagere structurele stabiliteit van vooral de oppervlaktehorizont. Na het rooien van het bos werd vroeger het kleinhout en de kruidenvegetatie dikwijls in brand gestoken (Sigaut, 1975: 98-111; Paillet, 2005: 114-115). Dit heeft een onmiddellijk positief effect op het gehalte aan beschikbare voedingsstoffen voor planten, omdat de as rijk is aan vrijgekomen minerale voedingsstoffen voor plantengroei zoals calcium, mangaan, kalium. Het nadeel is wel dat deze stoffen zeer oplosbaar zijn en met de neerslag, snel kunnen uitlogen. Een ander negatief gevolg is dat bij het branden van de strooisellaag, het bodemoppervlak bloot komt te liggen met het risico op bodemerosie en finaal heeft het afbranden van de vegetatie een negatief effect op de bodemfauna.

2.2. Erosie/sedimentatieprocessen op archeologische structuren

Zonder de aanwezigheid van de mens in België, zou het grootste deel van het land onder bos liggen en zou de bodem tegen erosie beschermd zijn. De geologische erosie/sedimentatie beperkt zich dan tot de omgeving van waterlopen, rivieren en langs de kust (figuren E85-E87). De mens daarentegen bouwt woningen van pleister, hout of harde materialen, legt terrassen aan, graaft sloten met steile hellingen, silo's en putten met steile wanden. Van

zodra deze structuren verlaten worden of in ongebruik geraken, zijn ze onderhevig aan erosie/sedimentatieprocessen. Ze zijn niet meer stabiel totdat de hellingen, al dan niet begroeid, een nieuw evenwicht bereikt hebben (figuren E28-E30, E40-E43, E48, E97, E140-E146, E176, E177).

Erosie geassocieerd met grachten en wallen (figuren E40-E43)

Volgende voorbeelden tonen aan dat eens een helling van 30° bereikt is, de structuren stabiliseren en onder bos enkele millennia lang kunnen bewaard blijven.



Fig. E40: Drie wallen (1) en twee grachten (2) rond de Michelsberg site van Watermaal-Bosvoorde, Zoniënwoud, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België.

Fig. E41: Zelfde site op het plateau. De weg vooraan dateert van de 20ste eeuw en doorkruist de meer dan 5.000 jaar oude grachten en wallen van de site. Deze foto illustreert duidelijk dat, eens de hellingen een 30-tal graden hebben bereikt, ze stabiel blijven onder een bosbestand als de site niet verder door de mens verstoord wordt.





Fig. E42: Gracht en wal van een stoeterij/paardenfokkerij opgericht in opdracht van Antoon van Bourgondië in het Zoniënwood rond 1420 AD. De hellingen zijn stabiel, waarschijnlijk stond er een palissade op de wal. Zo'n structuur wordt een 'wolvensprong' genoemd, vermoedelijk om de paarden te beschermen tegen wolven.



Fig. E43: Gelijkaardige structuur rond een stoeterij ten tijde van Aartshertogen Albrecht en Isabella (begin 16de eeuw). Zoniënwood, Groenendaal, provincie Vlaams-Brabant, België.

Erosie door zwaartekracht in grachten en sleufwanden, waarbij aardkundig onderzoek een belangrijke rol speelt bij de reconstructie van de originele archeologische structuren - *Viereckschanze*, Kontich, provincie Antwerpen, België (figuren E44-E49) (Langohr, 2000; Fechner, 2000; Hutchinson & Stuart, 2003).



Fig. E44-E45: Een bijna vijf meter diepe gracht op de site van de *Viereckschanze* te Kontich. (Annaert *et al.*, 1993).

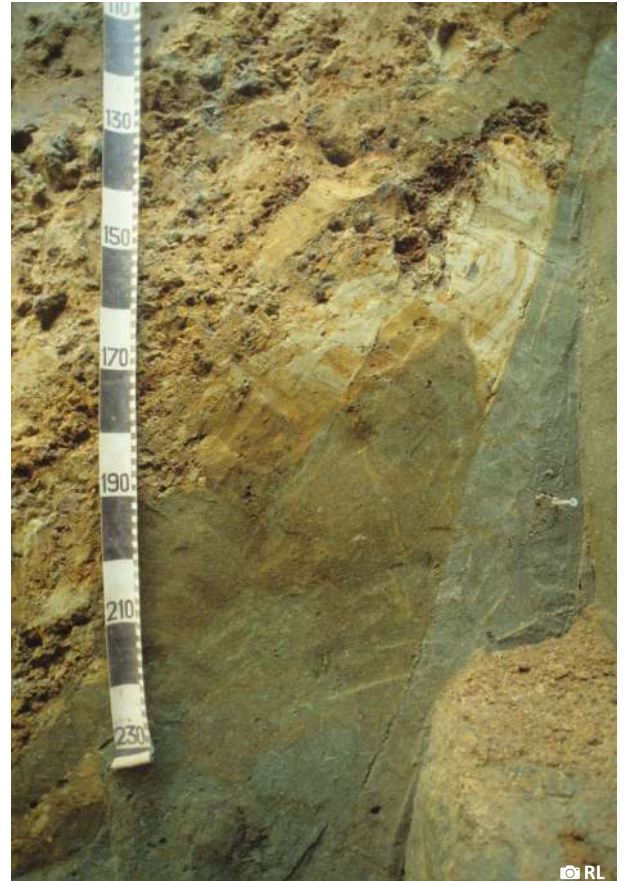


Fig. E46-E47: Voorbeeld van hoe de originele wand met plakken naar beneden is geschoven, waarschijnlijk ten gevolge van vorst en vorming van ijsbladen.



Fig. E48: Poging tot reconstructie van de originele grachtwand (gele vouwmeter - gele lijn op fig. E49) aan de hand van bodemfragmenten in het lagere deel van de gracht.

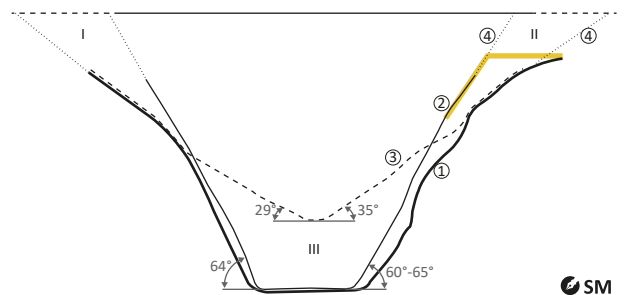


Fig. E49: Voorbeeld van de reconstructie van de originele grachtmorfologie.

- 1) grachtwanden zoals ze nu te zien zijn;
- 2) reconstructie van de originele grachtmorfologie; de helling van 60° is niet stabiel;
- 3) grachthelling na twee fasen van opvulling (afspoelend water en vorstplakken). De helling van 30° is de grens van stabiliteit;
- 4) extrapolatie van de hellingen in de zones die nu volledig gehomogeniseerd zijn. I + II) delen van de originele wand die nu ontbreken; III) onderste vullingen vooraleer de stabilisatiehelling is bereikt. Het volume van I + II is gelijk aan het volume van III. De vlakke bodem van de gracht wijst er op dat men waarschijnlijk gestopt is met dieper te graven, omdat de bodem te nat werd door de capillaire opstijging vanaf de grondwatertafel. (bron: Annaert *et al.*, 1993).

Graven en vullen van een gracht (figuren E50-E55)



Fig. E50-E51: Eolisch sediment in een gracht (1). De wind kwam van rechts. Wit zand, vooral bestaande uit kwarts en afgezet wanneer de wind het sterkst was, wisselt af met een zwart laagje van humus. In de grachtwand (2) is een 3 – 5 cm dikke licht gekleurde laag zichtbaar met hieronder plaatselijk een ijzeraanrijdingsbandje. Door waterverzadiging wordt het ijzer in de bodem gereduceerd en wordt het oplosbaar. Waar zuurstof aanwezig is, zal het ijzer terug neerslaan. Dit zijn bodemgeassocieerde kenmerken aan de archeologische structuur. Romeins kamp van Maldegem-Vake, provincie Oost-Vlaanderen, België.

Fig. E52: Reconstructie van wal en grachten van een Romeins kamp. Deze wanden met een helling van meer dan 30° zijn niet stabiel. Beaune, departement Côte-d'Or, Frankrijk.



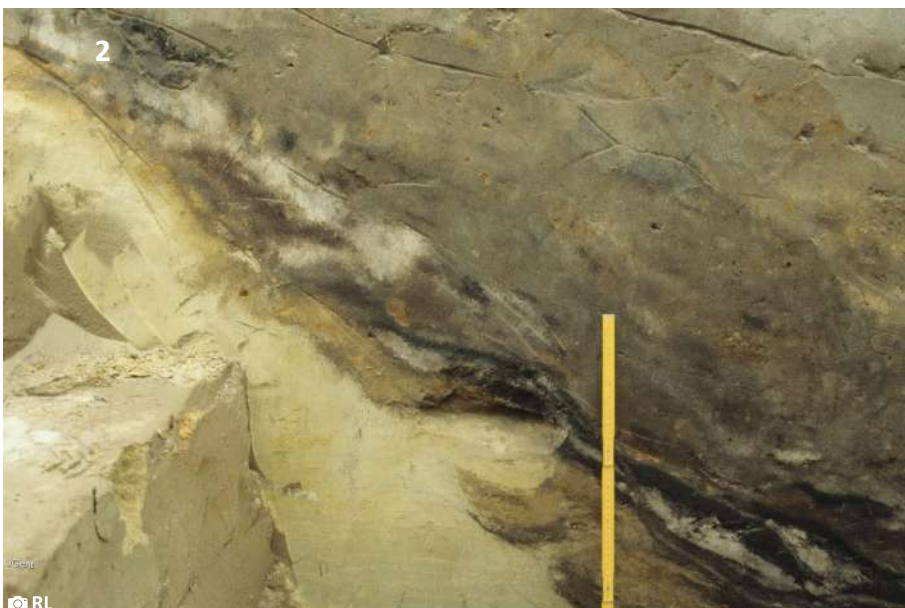
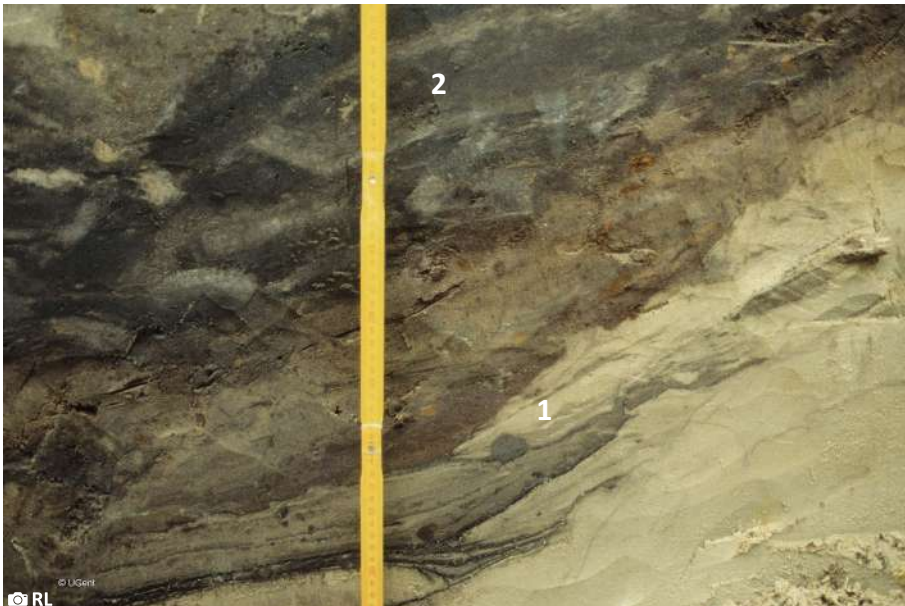
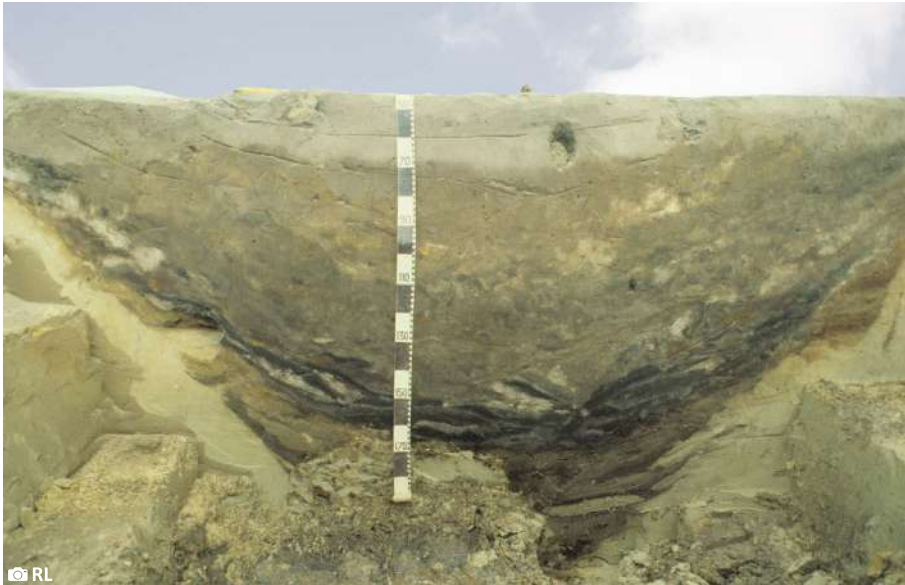


Fig. E53-E55: Gracht van een Romeins kampement. Blijkbaar werden de grachten uitgegraven in de zomer, wanneer de grondwatertafel laag stond. Later, wanneer de watertafel steeg, zakten de wanden in (1). Om dit proces te stoppen werden er grasplaggen op de wanden gelegd (2) wat de stabiliteit van de watergevulde gracht herstelde. Romeins kamp van Maldegem-Vake, provincie Oost-Vlaanderen, België.

3. Vormen van bodemerosie door water

Erosie bestaat enerzijds uit het losmaken van de bodemdeeltjes, anderzijds het verplaatsen van de deeltjes door water, wind, zwaartekracht ... Uiteindelijk worden de bodemdeeltjes afgezet, er vindt sedimentatie plaats. In de bodemkunde of landbouwwetenschappen wordt voor erosie door water op landbouwpercelen dikwijls de term ‘bodemerosie’ gehanteerd. In Vlaanderen is bodemerosie een van de belangrijkste vormen van bodemdegradatie (<https://www.dov.vlaanderen.be/page/bodemerosie>). Jaarlijks komt er ongeveer 460.000 ton sediment in waterlopen, grachten en rioleringen terecht (schriftelijke mededeling P. Deproost, Departement Omgeving, 2025, gesteund op gegevens van 2022).

Er zijn vele vormen van bodemerosie en sedimentatie. In de volgende paragrafen worden vooral de processen besproken die belangrijk zijn om de evolutie van de bodems van Vlaanderen sedert het neolithicum te begrijpen.

3.1. Het uiteenvallen van de bodemstructuur en verslemping

(En.: *surface sealing*; Fr.: *battance*)

Vooraleer men inzaait, wordt de bodem losgemaakt, zodat de bodemaggregaten voldoende fijn zijn. Deze structuur vergemakkelijkt de infiltratie van water en de beluchting van de bodem. Helaas drogen de fragmenten aan het oppervlak gemakkelijk uit en kunnen ze bij een eerste regenbui, als hun structurele stabiliteit laag is, uiteenvallen (zie kader ‘Humus en structurele stabiliteit van de bodem’). Dit proces noemt men desaggregatie. De bodemdeeltjes die daarbij vrijkomen, worden verplaatst door het water dat in de grond sijpelt en kunnen de poriën tussen de aardkluiten net onder het oppervlak verstoppen (En.: *surface seal*; Fr.: *croûte structurale*). Deze verstopping kan zo erg worden, dat het water niet meer in de grond infiltreert en aan het oppervlak stagneert (figuren E56-E60). Het eindresultaat van deze plaatselijke erosie/sedimentatie, is de vorming van een dunne oppervlakkige verslempingskorst (En.: *surface crust*; Fr.: *croûte de battance*) (figuren E56-E57). Deze korst kan verschillen naargelang het seizoen (le Bissonnais & Bruand, 1993), maar het uiteindelijke resultaat is dat het neerslagwater zo langzaam infiltreert dat het oppervlakkige afvloeit zal veroorzaken. Dit is de intergeulerosie of fijnlagige, diffuse erosie (En.: *sheet erosion*) (LNE, 2011: 7) (figuur E65). De verslempingskorst heeft ook een zeer negatieve invloed op de bodembeluchting, een belangrijke factor voor de plantengroei, in de eerste plaats voor de zaailingen.

Verslemping van de bodem door de impact van regendruppels op de bodem (figuren E56-E60)



Fig. E56: Verslemping aan het bodemoppervlak. Fig. E57: Verslempingskorst. Beauce, Frankrijk.



Fig. E58-E59: Verslemping en oppervlakkige afvloeï op een leembodem. Langsheen de helling is er een sortering van het colluvium afgezet door oppervlakkige afvloeï.

Fig. E58: Leembodem met ongeveer 5 % fijn zand, 75 % leem, 20 % klei en 1 - 2 % humuscolloïden. In zone (1) is het bodemoppervlak verslempd door het spatten en het uiteenvallen van de bodemkluiten. In zone (2-3) is er oppervlakkige afvloeï, erosie en sedimentatie (colluvium). Naargelang de hellingspositie ontstaat er een scheiding van de deeltjes met eerst sedimentatie van de grovere lichtgekleurde fractie van voornamelijk grove leem en fijn zand (2) en in de microdepressie afzetting van donkerbruine klei- en humuscolloïden (3). Overijse, provincie Vlaams-Brabant, België.



Fig. E59: Verslemping van het bodemoppervlak met de vorming van een verslempingskorst in de leemstreek. Tervuren, provincie Vlaams-Brabant, België.

Fig. E60: Door de ontwikkeling van een verslempingskorst stagneert het neerslagwater aan de oppervlakte in de microdepressies, dit is geen grondwatertafel! Overijse, provincie Vlaams-Brabant, België.



3.2. Spaterosie: bodemerosie door de inslag van regendruppels

(En.: *raindrop erosion, splash erosion*)

Wanneer een regendruppel met zijn slagkracht de grond raakt, en vooral wanneer de waterverzadigde bodem een verslompingskorst heeft, vormt er zich een kleine krater en kan er tot meerdere decimeters hoog een beetje modder opspatten (FAO, 1965: 23). Voor een druppel die op een helling verticaal naar beneden valt, zullen er vanaf het inslagpunt meer bodemdeeltjes naar beneden dan naar bo-

ven bewegen (figuren E61-E64). Hoe steiler de helling, hoe verder de bodemdeeltjes hellingafwaarts neerkomen. Het uiteindelijke resultaat is dus een hellingafwaartse verplaatsing van grond. Voor een druppel vertegenwoordigt dit bijna niets, maar als we rekening houden met het aantal druppels dat tijdens een stortbui op het bodemoppervlak valt, kan dit een grote hoeveelheid grond verplaatsen. Het transport vindt plaats over een korte afstand, maar de impact van druppels bereidt de grond voor op verdere erosie door oppervlakkige afvloe (Bryan, 1987: 4) (figuren E65-E68). Spaterosie heeft weinig impact op de verplaatsing van artefacten.

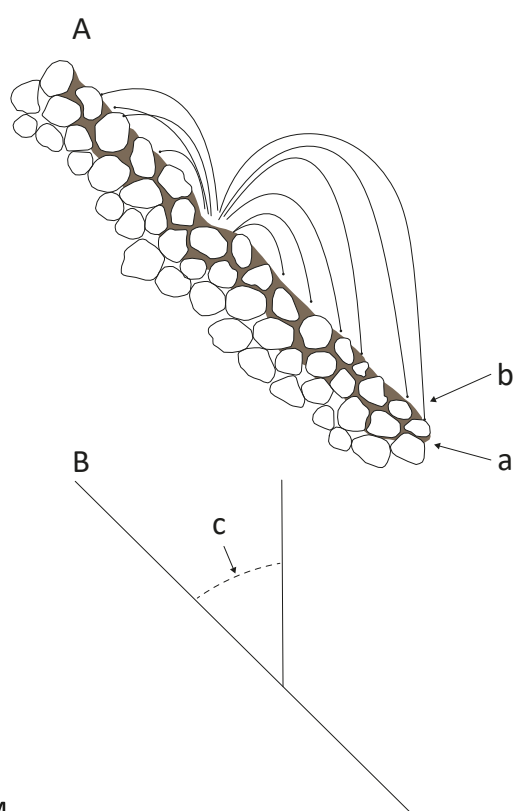


Fig. E61: Spaterosie: A) impact van een druppel op een hellend bodemoppervlak dat waterverzadigd is (a), doet bodemdeeltjes opspatten (b). B) meer bodemmateriaal wordt hellingafwaarts dan hellingopwaarts verplaatst wanneer de druppel onder een scherpe hoek (c) op het bodemoppervlak valt (bron: Langohr, 1990).

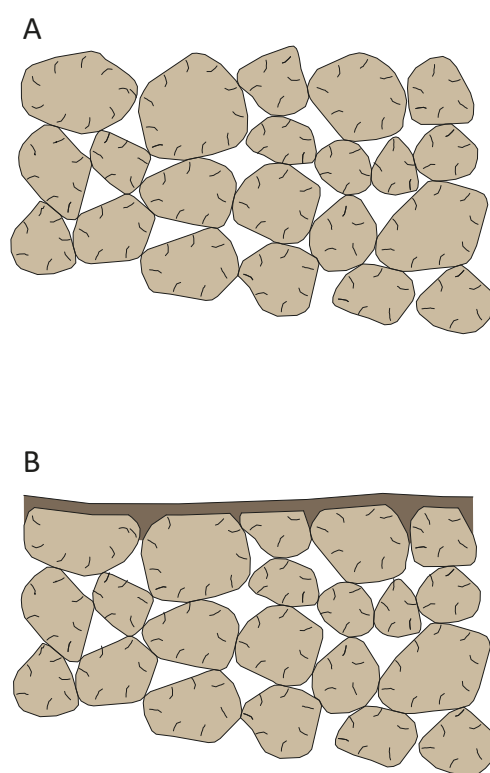


Fig. E62: Vorming van een verslompingskorst: A) een bodemoppervlak met losse bodemkluiten van enkele millimeters tot meer dan een decimeter in diameter. B) het bodemoppervlak na de vorming van een verslompingskorst waardoor de waterinfiltratie sterk beperkt is. (bron: Langohr, 1990).

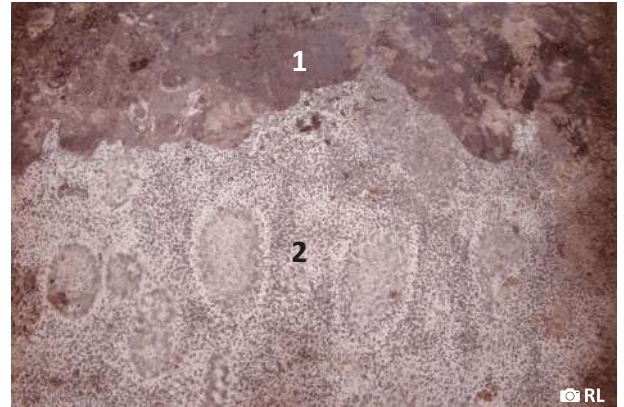


Fig. E63-E64: Spaterosie op een zandbodem. Fig. E63: Horizontaal vlak van een proefsleuf, met detail Fig. E64: Ongestoorde zandbodem rijk aan humus (1). Door de kracht van het spatten is de organische stof gescheiden van de minerale fractie die voornamelijk uit witte kwarts bestaat (2). Rooiveld-Papevijvers, Oostkamp, provincie West-Vlaanderen, België. (Van de Vijver *et al.*, 2009).

3.3. Diffuse oppervlakkige afvloeï

(ook nog: fijnlagige erosie, intergeulerosie; En.: *overland flow, sheet erosion*)

Zodra het neerslag- of smeltwater op het bodemoppervlak stagneert, kan het, afhankelijk van de hellingsconfiguratie, beginnen bewegen. Deze beweging is min of meer gelijkmatig. De kracht die wordt uitgeoefend door deze diffuse afvoer is in staat om deeltjes van humus, klei, leem en zelfs zand te verplaatsen (figuren E65-E68). Voor het transport van grind of artefacten is de kracht van het afstromende water niet voldoende. Zo kunnen deze fragmenten, aanwezig in of op de oppervlaktehorizont, achterblijven en kan er een concentratie ontstaan in de vorm van een keienvloer (En.: *erosion pavement*) (figuren E69-E75). De kracht van de oppervlakkige afvoer is het grootst op de benedenhelling, omdat de hoeveelheid water toeneemt naarmate de afgelegde afstand groter is.

Oppervlakkige afstroming en sedimentatie (figuren E65-E68)



Fig. E65: Oppervlakkige afstroming met erosie van zand, leem en klei (En.: *sheet erosion*). Grovere elementen (artefacten...) bewegen praktisch niet en concentreren zich aan het oppervlak. Centrale Valleï, Chili.

Fig. E66: Erosie langs een topotranssect. (1): plateaupositie met weinig of geen erosie. (2): licht convexe bovenhelling met vooral erosie door oppervlakkige afvloeï. (3): rechte middenhelling met geconcentreerde afvloeï met geulerosie die sterker wordt naarmate de helling langer is. (4): concave voethelling met afzetting van de grovere fracties van het sediment (colluvium). (5): het vlak bodemdalen met colluviale afzetting van de fijnste sedimentfracties. Polen.

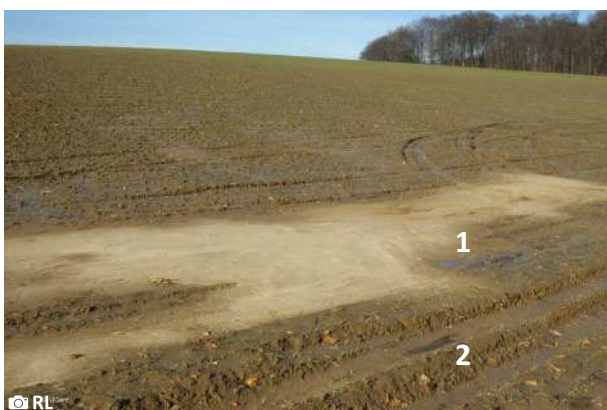


Fig. E67: Oppervlakkige afvloeï veroorzaakt de afzetting van colluvium. Het sediment is gesorteerd met eerst de afzetting van de grovere leemfractie (hoofdzakelijk kwarts) (1) en iets lager de bruinere kleifracctie (2). Fig. E68: De ploegrichting hellingafwaarts bevordert erosie. Fig. E67-E68: Leemstreek, Tervuren, provincie Vlaams-Brabant, België.

Natuurlijke en antropogene keienvloeren of stenen vloeren (figuren E69-E75)



Fig. E69: Erosie van de fijne bodemdeeltjes door oppervlakkige waterafvloei en winderosie. De grovere elementen blijven min of meer ter plaatse en kunnen een steenlaag vormen. Poike vulkaan, Paaseiland, Chili. Fig. E70: De afgeronde steen rechts is een overblijfsel van een stenen sokkel van een kampement. Poike vulkaan, Paaseiland, Chili.



Fig. E71: Een wijngaard met een oppervlakkige laag riviergrind aangebracht door de mens.

Fig. E72: Detail van fig. E71: onder ongeveer 5 cm grind zit de originele lemige zandbodem die geen stenen bevat. De laag stenen, die boven op de bodem is gebracht, bevordert een hogere temperatuur, een goede waterinfiltratie en beperkt de waterverdamping van de bodem.

E71-E72: Bevaix, kanton Neuchâtel, Zwitserland.



Fig. E73: Een steenlaag aangelegd voor een Romeinse weg.
Fig. E73-E75: Opgraving Obuda, Budapest, Hongarije.

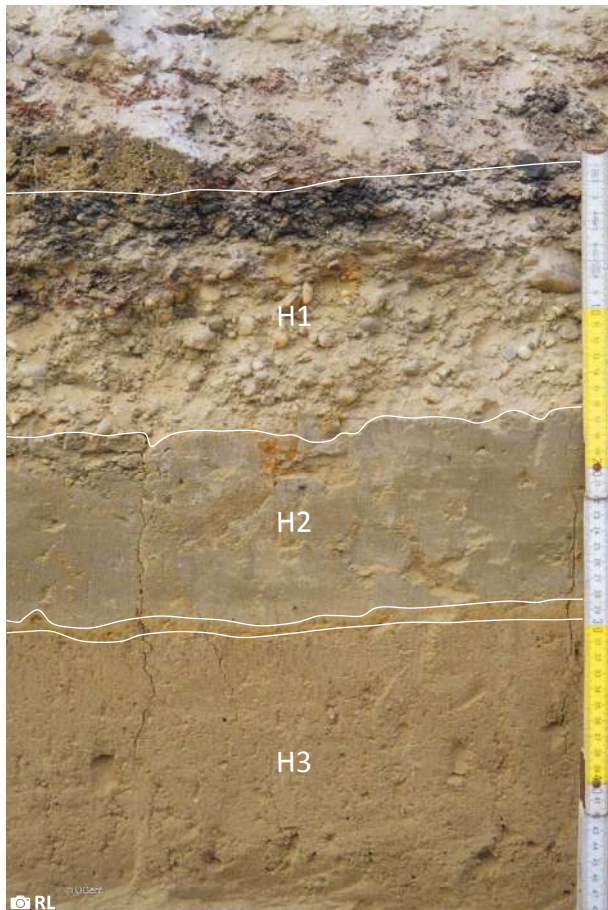


Fig. E74: H1: een grindlaag van een weg; H2: de bedolven ploeglaag bezat oorspronkelijk een hoge porositeit, maar is door het gewicht van de weg samengedrukt. Hierdoor is er in deze laag weinig lucht en zuurstof aanwezig waardoor reductiecondities ontstaan en ijzer mobiel wordt. Dit ijzer is gemigreerd tot het contact met de onderliggende horizont (H3) waar een ijzer-aanrijgingsbandje ontstaat.



Fig. E75: Detail van de ijzerneerslag op het contact tussen de compacte en niet-compacte horizont.

Een bijzondere vorm van oppervlakkige afvloeï is erosie op zandbodems zoals duinen. Dit kan te wijten zijn aan het waterafstotend vermogen van zand dat een beetje is aangerijkt met organische stof afkomstig van de afbraak van vegetatie (bijvoorbeeld Dekker, 1998; DeBano, 2000; Ampe & Langohr,

2003) (figuren E76, E77). Soms kan fijnlagige erosie voorkomen op duinen wanneer een algenkorst zich aan het oppervlak ontwikkeld heeft (De Ploey, 1997: 138). Deze oppervlakkige afvloeï kan zelfs overgaan tot geulerosie (figuur E78).

Oppervlakkige afvloeï en geulerosie op hydrofobe zanden - Kustduinen, provincie West-Vlaanderen, België (figuren E76-E78) (Ampe, 1998)



Fig. E76: Droog zand met een klein beetje organische stof wordt waterafstotend (hydrofoob). Hierdoor kan er oppervlakkige afvloeï ontstaan op duinen. De donkere organische stof is verder verplaatst dan de zwaardere zandkorrels.



Fig. E77: Sedimentatie van duinzand ter hoogte van de voethelling.



Fig. E78: Geulerosie op duinzand door hydrofobie. De hydrofobie is enkel actief als het zand droog is.

3.4. Geulerosie

(En.: *rill erosion*)

Het bodemoppervlak is bijna nooit perfect vlak. Daarom zal het water tijdens de oppervlakkige afvloeï en in functie van de meso- en microtopografie van het bodemoppervlak, zich op bepaalde plaatsen concentreren. Op een akker is dit microreliëf vaak te wijten aan de bodembewerking (figuren E66, E68, E79-E81). Water volgt de weg van de kleinste weerstand en concentreert zich hellingafwaarts meer en meer. Dit veroorzaakt een grotere erosiekracht, waardoor er een ondiepe insnijding ontstaat. Naarmate de afgelegde helling langer wordt, vloeit er meer water van de oppervlakkige afvloeï in de geul en neemt de waterconcentratie en de erosiekracht toe.

De erosiekracht in de geulen overtreft deze van de diffuse afvoer met factor 10 en is voldoende om

grind en artefacten tot ongeveer 9 cm in diameter te transporteren tijdens een zware regenbui. Poesen (1987) stelde vast dat het niet zozeer de vorm, maar de grootte van de fragmenten is die de afgelegde afstanden beïnvloedt. Dit komt omdat het transport van de fragmenten met een waterstroming, in korte maar sterke golven werkt. Aangezien de meeste door de mens geproduceerde artefacten eerder een afgeplatte dan een ronde vorm hebben, is dit een belangrijke vaststelling en betekent dit dat ook afgeplatte artefacten kunnen bewegen.

Per definitie is bij geulerosie de insnijding van de geulen niet groter dan de diepte van het ploegen (Bryan, 1987: 1) wat overeenkomt met ongeveer 20 tot 30 cm. Bij de volgende bodembewerking worden de geulen dus weggeploegd. Zijn de geulen nog

420 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

dieper uitgeschuurd dan spreekt men van ravijnerosie (zie § 3.5). Omdat de dichtheid van de geulen vrij hoog kan zijn (figuren E66, E80), kan geulerosie een aanzienlijk verlies van teelaarde met zich meebrengen. Het materiaal dat van de akker afgevoerd wordt, is rijk aan organisch materiaal en bevat meststoffen, maar ook gewasbeschermingsmiddelen. Er is dus sprake van een belangrijke vermindering van de bodemvruchtbaarheid en van vervuiling en

eutrofiëring van de waterlopen. Het is op de middenhelling en vooral op de lagere rechte helling dat de geulen belangrijk kunnen worden, omdat op dit niveau een maximale hoeveelheid water door de geulen stroomt (figuren E79-E81). De hellingsgraad is hier van minder belang: mits de afstanden lang genoeg zijn, kunnen geulen ontstaan op hellingen van slechts 2-3 graden (De Ploey, 1984).

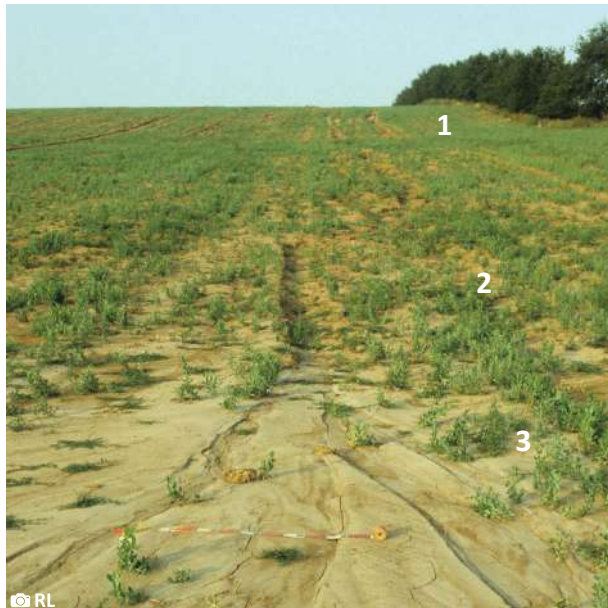


Fig. E79: Geconcentreerde afstroming met de vorming van geulen. Grovere elementen (> 2 mm, artefacten) kunnen nu wel getransporteerd worden. (1): Bovenaan de helling is de geulerosie beperkt. Op de middenhelling is er meer erosie door een toename van waterafstroming met de ontwikkeling van geulen op de lagere hellingsposities (2). Van zodra de helling concaaf wordt, zet sediment zich af (colluvium) (3) volgens een korrelgroottegradiënt met sedimentatie van eerst de grovere fractie en verderop de fijnere fracties.

Fig. E80: Detail van de diepe geul van Fig. E79. Nitra, Slowakije.



Fig. E81: Diffuse oppervlakkige afvloeï en sedimentatie die hellingafwaarts verder evolueert tot geulerosie. Heuvelland, provincie West-Vlaanderen, België.

3.5. Ravijnvorming en regressieve erosie

(En.: *gully erosion*)

Vanaf het moment dat de geulvorming in de bodem zo diep wordt en de geulen niet meer kunnen dichtgeploegd worden, spreekt men van ravijnerosie. Deze vorm van erosie tast de diepere horizonten aan die arm zijn aan organische stof. Tot nu toe werd het transporteren van grond vooral veroorzaakt door de erosieve kracht van het water dat over het oppervlak en in de geulen stroomde. Bij ravijnvorming wordt het terugschrijdende of regressieve erosieproces dominant naarmate de insnijding van het ravijn dieper wordt. Het proces begint vanaf de wanden van het ravijn die aan neerslag worden blootgesteld (figuren E82-E84). De diepere bodem, met weinig of geen organische stof, zal gemakkelij-

ker instorten en sneller eroderen dan de oppervlaktehorizont die rijker is aan organische stof en dus stabiel is (zie kader 'Humus en structurele stabiliteit van de bodem'). Geleidelijk aan zal op de lagere hellingen, het ravijn eroderen en zo de oppervlaktehorizont ondermijnen totdat ze instort. Eenmaal regressieve erosie ontstaat op de wanden van het ravijn, breidt deze zich verder uit op terreinen met weinig reliëf en zelfs op plaatsen met weinig of geen watertoevoer. De aanwezigheid van een lange en/of steile helling, zoals bij geulerosie, is hier dus niet vereist. Door regressieve erosie storten de wanden van de ravijnen in en kunnen er zich netwerken vormen die een hele heuvel aantasten (figuur E84).

Terugschrijdende erosie en ravijnen (figuren E82-E84)



Fig. E82: De geul, die nochtans evenwijdig aan de helling loopt, gaat over tot een ravijn op de voorgrond. Leemstreek, Schorisse, Maarkedal, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. E83: Ravijnerosie in de leemstreek. Door terugschrijdende erosie eroderen de diepere bodemhorizonten die arm zijn aan stabiliserende organische stof en die blootgesteld zijn aan neerslag (pijlen). De oppervlakkige humusrijke horizonten die normaal stabiel zijn, zakken in door ondermijning. Grove elementen en artefacten kunnen hier getransporteerd worden over grotere afstanden. Gembloux, provincie Namen, België.



Fig. E84: Spectaculaire regressieve erosie met ravijnvorming die de hele helling aantast. Mlilwane, Swaziland.

4. Fluviale erosie en sedimentatie

Bij de bespreking van fluviale erosie en sedimentatie moet men een onderscheid maken tussen de riviergeul en de alluviale vlakte. Rivieren kunnen grote hoeveelheden rotsachtige fragmenten en zeer heterometrische sedimenten transporteren. Dit materiaal wordt vanaf de valleihellingen door de zwaartekracht aangebracht. Dit type erosie en riviertransport is een van de hoofdoorzaken van de geleidelijke erosie van bergketens. Erosie is over het algemeen belangrijker dan sedimentatie.

In de alluviale vlakte is de dynamiek helemaal anders. Er zijn periodes en zones met erosie die afwisselen met periodes en zones van sedimentatie (figuren E85-E93). Tijdens interglaciale perioden,

zoals het huidige Holoceen, is de mondiale dynamiek duidelijk in het voordeel van sedimentatie. Daarbij kunnen bodems, gevormd tijdens vroegere periodes van stabiliteit begraven worden. Sinds het neolithicum, vooral als gevolg van de uitbreiding van landbouwgebieden, is de toevoer van sedimenten in de alluviale vlaktes opmerkelijk toegenomen (figuren E89-E93). Door vervolgens dijken aan te leggen, voornamelijk vanaf de middeleeuwen, en de alluviale vlaktes onder intensieve landbouw te brengen, overstromen ze niet meer en worden er geen verse sedimenten meer afgezet (figuur E88).

Erosie/sedimentatie in alluviale vlaktes (figuren E85-88)



Fig. E85: Slibafzetting in alluviale vlakte. Tisza rivier, Hortobaghy Nationaal Park, Debrecen, Hongarije.



Fig. E86: Erosie van rivieroever en afzetting van riviergrind. Spanje.

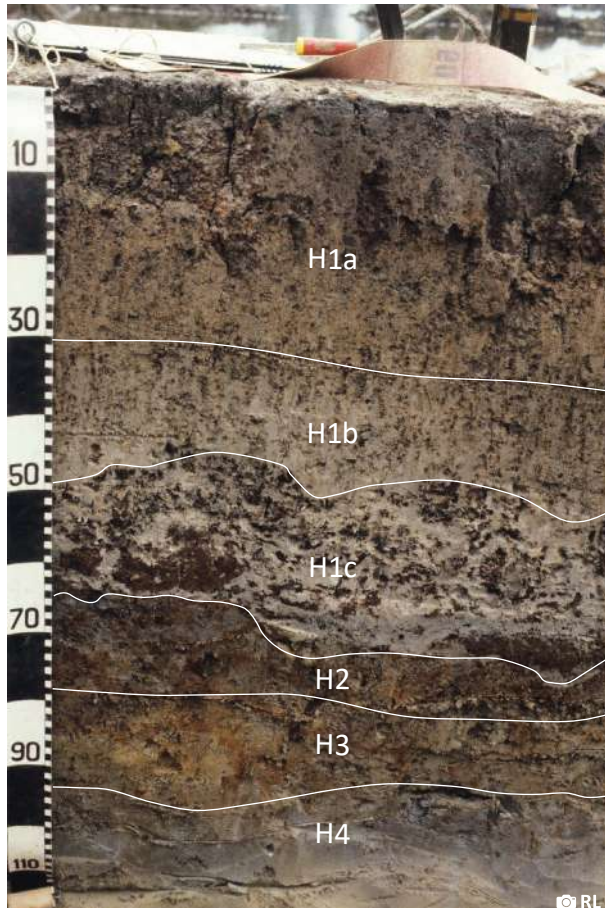


Fig. E87: Riviererosie in alluviaal bos. Semois rivier, België.



Fig. E88: Alluviale vlakte van de Schelde tijdens hoogwater. De kleine dijk (zomerdijk) belet de overstroming van brak water op de akker in de polder. Temse, provincie Oost-Vlaanderen, België.

Erosie/sedimentatie in alluviale bodems (figuren E89-E93)



H1: 0-67/77 cm: Ap; post-Romeins kalkhoudend alluvium afkomstig van intensieve landbouw in de omgeving. Dit materiaal is afkomstig van de hogerop gelegen leemstreek met plaatselijk erosie tot op de kalkhoudende leem.

- H1a: 0-30/36 cm: oppervlaktehorizont met humusaanrijking en structuurontwikkeling.
- H1b: 30/36-44/53 cm: blekere overgangshorizont.
- H1c: 44/53-62/77 cm: zand, veenfragmenten.

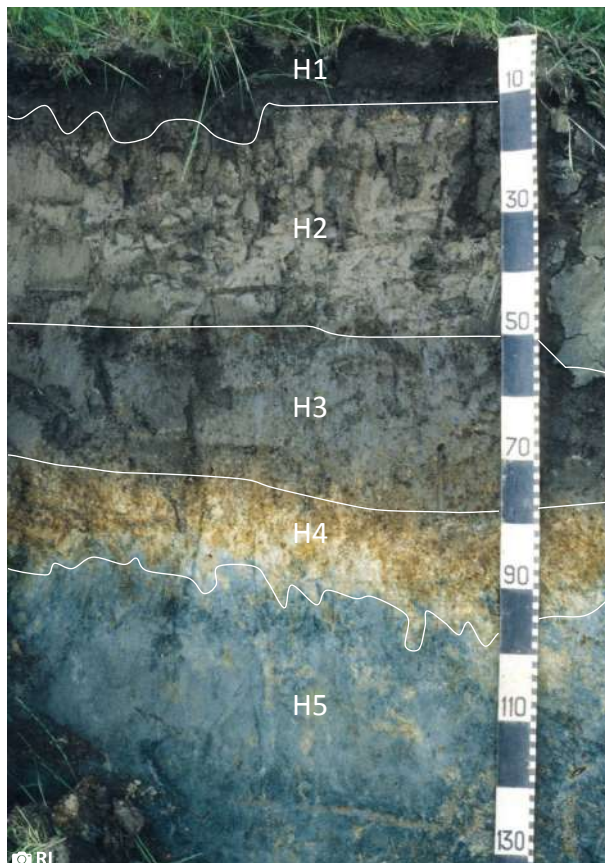
H2-H3: 62/77-92/98 cm; bedolven bodemprofiel ontwikkeld in pre-Romeins alluvium, zonder kalk.

- H2: 62/77-79/83 cm: Apb; oorspronkelijke humusrijke oppervlaktehorizont.
- H3: 89/93-92/98 cm: Bwb; kleur-B horizont.

H4: 92/98+ cm: Crb; gereduceerd, permanente grondwatertafel.

◀ Fig. E89: Bodem ontwikkeld in alluvium. Oudenaarde Donk, provincie Oost-Vlaanderen, België. Het profiel toont tot 95 cm diepte de sporen van een fluctuerende grondwatertafel (roest-vlekken).

Fig. E90-E91 (detail): Schelde alluvium. Er is geen fijne stratificatie waarneembaar wat wijst op een trage sedimentatie in een moerasvegetatie. Oudenaarde Donk, provincie Oost-Vlaanderen, België.



H1: 0-11/20 cm: A; huidige humusrijke oppervlaktebodem.

H2: 11/20-47/57 cm: Al; humusrijk, kalkrijk, lemig alluvium, licht gereduceerd.

H3: 47/57-71/80 cm: 2Al; humusrijk, kalkloos, kleig alluvium, weinig vivianiet.

H4: 71/80-85/100 cm: 3Bcg; iets grovere textuur, ijzeraccumulatie met talrijke concreties; strogele neerslag van jarosiet, een ijzersulfaat dat wijst op zeer zure bodemcondities. Het vormt zich door oxidatie van pyriet in een kalkloos milieu.

H5: 85/100-130+ cm: 4Bg; klei, veel voorkomende viviantietaccumulatie, blauwe kleur kenmerkend voor geoxideerd vivianiet, een ijzerfosfaat.





Fig. E92: Alluvium van de Geer rivier. Darion, provincie Luik, België. Geen fijne stratificatie. Afzetting in een moerasvegetatie. (Langohr & Sanders, 1985b). 0-90 cm: kalkrijk alluvium gebonden aan erosie door landbouw van lössbodems in het stroomgebied; 90-170 cm: oud, kalkvrij alluvium met begraven humusrijke oppervlaktehorizont tussen 90-110 cm.



Fig. E93: Alluvium van de Geer rivier. Darion, provincie Luik, België. Vanaf 70 cm is de stratificatie te zien wat wijst op een afzetting die weinig of niet begroeid is geweest.

5. Erosie door zwaartekracht: massabewegingen of hellingsprocessen

(En.: *mass movement*)

De term massabewegingen wordt gebruikt om processen aan te duiden waarbij materiaal in eerste instantie verplaatst wordt door de zwaartekracht (figuren E94, E95). Naargelang het type massabeweging kan ook water minder of meer een rol spelen, maar dan eerder als een smeermiddel. De bijkomende rol van water is simpelweg het gewicht

ervan. Een bodem met 50% van zijn volume in de vorm van poriën kan tot 500 liter (kilo) water per kubieke meter bevatten. De fysica leert ons dat druk in alle richtingen wordt uitgeoefend op voorwaarde dat er een continu netwerk van de poriën aanwezig is. Zo kan een met water verzadigde bodem op een helling, een extra inwendige druk ondergaan die gedeeltelijk afkomstig is van de hoger gelegen bodem (figuren E99, E110, E113, E114). Omgekeerd is het duidelijk dat bij de eerder besproken vormen van bodemerosie door water (zie § 3), ook de zwaartekracht een rol speelt.



Fig. E94: Instorten van de valleiwand langs de Ula rivier. Rondane Nationaal Park, Zweden.



Fig. E95: Instorten van de krijt-wandrots. Fécamp, departement Seine-Maritime, Frankrijk.

Massabewegingen spelen een zeer belangrijke rol bij antropogene constructies. Muren of aarden wanden van greppels, silo's of putten kunnen, van zodra de site wordt verlaten, kruipen, verglijden of instorten en sediment produceren.

Onder de vele vormen van erosie door zwaartekracht, bespreken we hier enkel de vormen die in Vlaanderen zowel op landschapsniveau als op het niveau van archeologische structuren actief zijn of geweest zijn. Eerst worden de processen besproken die weinig of geen water nodig hebben zoals vallen en kruipen, gevolgd door de processen solifluctie en grondverschuivingen en om te eindigen met de vormen waar water een belangrijke rol speelt zoals bijvoorbeeld modderstromen. Sommige van deze processen verlopen geleidelijk of langzaam zoals kruipen, andere hebben een snel en soms catastrofaal verloop zoals modderstromen.

Opmerking: de terminologie van de verschillende massabewegingen kan variëren van het ene handboek tot het andere. Het is aangeraden te refereren naar de documenten die men volgt (Van Den Eeckhout *et al.*, 2007).

5.1. Vallen/instortingen

(En.: *fall*)

Zowel een uitgegraven structuur, bijvoorbeeld een gracht, als een opgehoogde constructie, bijvoorbeeld een aarden wal, hebben een helling. Wanneer deze helling te steil is, zodat er geen stabiele vegetatie kan groeien, kan de structuur eroderen. Droog/vochtig en vries/dooi cycli maken fragmenten los die naar beneden vallen. Aan de voet van de helling wordt aarde afgezet. Het onderste deel van het talud wordt dus vrij snel beschermd tegen verdere erosie omdat de voethelling bedekt geraakt met sediment (figuren E49, E96) en de zachtere helling een stabiele vegetatiegroei bevordert. Hellingsreconstructie is een belangrijke informatiebron over de originele helling van de archeologische structuur. Het instorten gaat door totdat de vegetatie de hele helling en de sedimenten aan de voet van de constructie kan stabiliseren (figuren E97, E98). Gewoonlijk bedraagt deze evenwichtshelling, bedekt door permanente vegetatie, maximum 30 tot 40 graden voor lemige en zandige bodems. Deze cijfers zijn afkomstig van experimentele locaties (e.g. Van Beek *et al.*, 2008: 21), metingen in het veld (bijvoorbeeld Hutchinson & Stuart, 2003) en observaties gemaakt door R. Langohr op *tumuli* en dijksites (figuren E41-E43, E49, E97, E98, E111). De gedeeltelijke vulling van kuilen en grachten wordt meer in detail behandeld in Langohr (2000); een reeks voorbeelden waargenomen op archeologische sites is samengevat in Fechner (2000).

Erosie door de zwaartekracht op wanden van grachten en sleuven (figuren E96-E99)



Fig. E96: De wand van een sleuf was oorspronkelijk verticaal (rood). Door droog/vochtig en vries/dooi cycli is de bovenste helft naar beneden geschoven (wit). Dit is te zien aan de wortels die uitsteken en de aarde die de onderste helft van de originele wand bedekt. De hellingsgraad is nu 45°, wat nog te steil is voor het vestigen van vegetatie. De stenen aanwezig in de geërodeerde aarde zijn naar beneden gerold. Boudry, kanton Neuchâtel, Zwitserland.



Fig. E97: De verticale wand van de sleuf is gedeeltelijk ingestort. Het geërodeerde sediment op de voethelling heeft een helling waarop vegetatie kan groeien. Ekeren, provincie Antwerpen, België.

Fig. E98: Grote fragmenten van de verticale wand zijn naar beneden gevallen. Het proces is nog steeds actief. Vooraan: de vegetatie begint te koloniseren op plaatsen waar de helling minder steil is. District Cambridgeshire, Engeland.



Fig. E99: Waterverzadiging verhoogt het gewicht van de bodem en vermindert sterk de stevigheid van de bodem. Hierdoor kunnen grote brokken van de profielwand vallen. Op de achtergrond is er een instorting ter hoogte van een archeologische structuur. Ename, provincie Oost-Vlaanderen, België.

5.2. Kruipen

(En.: *creep, soil creep*)

Kruipen is een zeer langzame hellingafwaartse beweging van een dunne oppervlakkige bodemlaag op een helling (figuren E100-E104). Het is een weinig spectaculaire vorm van erosie. Het bewegingsbereik neemt asymptotisch af met de diepte. Er is geen echte breuk in het profiel, maar eerder sprake van het uitrekken van de bodem. Bij rotswanden of (onderdelen van) gebouwen gaat het over een beweging van fracties van millimeters (Fedà, 1992: 30). Op andere terreinen, zoals bodems op hellingen, worden bewegingen van enkele mm per jaar vermeld (Campy & Macaire, 2003: 167). Vanaf het moment dat er een breuk optreedt (En.: *creep failure*), treden andere processen op zoals instortingen en grondverschuivingen. Kruipen vindt plaats op zowel constructies in harde materialen, als langs structuren die in de grond zijn gegraven en waarvan de hellingen nog niet in evenwicht zijn (Fedà, 1992). In de natuur beïnvloedt dit proces het bovenste deel van klifrotsen of glooiende bodemlandschappen.

Tijdens de vorst kan ijssegregatie, parallel aan het bodemoppervlak, het kruipproces gemakkelijk activeren (figuur E104) (zie §4.2 - thema 'Periglaciale processen en kryoturbatie'). In een periglaciale omgeving kan het kryoreptatieproces uitzonderlijk grote verplaatsingen van de bodem met eventuele artefacten veroorzaken. Dit gaat tot dieptes van enkele decimeters en over afstanden van tientallen

meters. Droog/vochtig cycli op sterke hellingen kunnen ook dit soort bewegingen veroorzaken maar op veel kleinere schaal.

Het kruipproces is te herkennen aan de groei van de bomen waarvan de onderzijde van de stam een brede bocht vertoont langs de helling (figuren E101-E102). Soms zijn echter kromgegroeide bomen het resultaat van het gewicht van sneeuw of aarde en stenen die van de helling worden gedrukt door het passeren van dieren. In dit geval is de kromming van de stam veel korter, omdat de stam van jonge planten de druk, uitgeoefend door het gewicht van de sneeuw of de sedimenten, niet kan weerstaan (figuur E101). Wanneer de stam van de boom dikker wordt, is deze beter bestand tegen uitwendige druk en groeien de bomen rechtop.

Kruipen is een van de bewegingen die wordt waargenomen na het uitgraven van constructies in de grond met te steile, onstabiele hellingen. De bermen van wegen of de wanden van sloten, aangelegd voor drainering of afbakening van percelen, zijn de zones die onderhevig kunnen zijn aan kruipen.

Kruiperosie (figuren E100-E104)



Fig. E100: Kruip te zien aan de boomstammen die een grote buiging vertonen, zelfs als de boomstam al redelijk dik is. Centrale Pyreneeën, Spanje.



Fig. E101: Dikwijls wordt de buiging aan de basis van bomen toegeschreven aan het kruipproces. Dit voorbeeld is echter geen kruip. De kromming van de stammen is veroorzaakt door het gewicht van sneeuw en/of vallende stenen die druk uitoefenden op de jonge boomstammetjes. Wanneer de stam dikker en steviger wordt, stopt deze morfologie. Departement Alpes Maritimes, Frankrijk.



Fig. E102: De buiging, hellingafwaarts, van de prismastructuur, wijst op een kruipproces. Tertiaire glauconietrijke klei bedekt door 60 cm leem. Kooigem, provincie West-Vlaanderen, België. Fig. E103: Detail van fig. E102.



Fig. E104: Kryoreptatie van schiefer. Het kruipproces is frequent in periglaciaal milieu. Ardennen, België.

5.3. Solifluctie

(En.: *solifluction*)

Solifluctie is een meer ingrijpend proces in de bodem dan kruipen. De bodemhorizonten worden meer vervormd en de snelheid van het proces bedraagt in het algemeen tot enkele centimeters per jaar. Er zijn vier voorwaarden nodig om tot solifluctie te komen:

1. een helling, die slechts enkele graden kan zijn,
2. een vrij poreuze grond,
3. grond die gedurende een periode van het jaar, zoals tijdens het smelten van sneeuw, sterk waterverzadigd is, en
4. de aanwezigheid van een weinig doorlaatbare laag zoals klei, rotsen of een bevroren grond op een diepte van meestal minder dan een meter.

Wanneer dit proces gebonden is aan vries/dooi en/of permafrost, wordt dit congelifluctie of gelifluctie genoemd (Pissart, 1987: 88) (zie thema 'Periglaciale processen en kryoturbatie'). In het geval van permafrost, ondooit in de zomer het bovenste bodemlaagje en geraakt het waterverzadigd, omdat

het water niet in de bevroren ondergrond kan indringen.

Bij solifluctie overschrijdt het gewicht van de bodem de limiet van interne bewegingsweerstand en begint het geheel voort te bewegen, een beetje zoals een gelei die over een hellend oppervlak glijdt. Net als bij het kruipproces is de beweging het sterkst nabij het oppervlak en het minst nabij het contactvlak met de ondergrond. Het resultaat is de vorming van lobben, solifluctielobben, die volledig op zichzelf kunnen rollen (figuren E105-E109). Solifluctie wordt beschouwd als het belangrijkste proces van erosie/sedimentatie tijdens de ijstijd om de wijde verspreiding van stenige bodems te verklaren, vooral in Zuid-België (bijvoorbeeld Deckers, 1966: 40). Deze bodems worden ook 'heterogene leem' genoemd: de löss van eolische oorsprong is in wisselende verhoudingen gemengd met lokaal materiaal zoals gesteentefragmenten (bijvoorbeeld Maréchal, 1958: 57-69).

Periglaciale hellingsprocessen: voorbeelden van solifluctie (figuren E105-E109)



Fig. E105: Groevewand in leem, in de winter tijdens vorst, met 1) bevroren groevewand; 2+3) een sedimentaire sequentie van oppervlakkige afvloe van een vroegere regenperiode. De zwaardere witte kwarts is eerst afgezet (2), de bruine klei iets verder (3); 4) solifluctie van niet gesorteerde leem als gevolg van dooi en waterverzadiging van de oppervlaktehorizont. Overijse, provincie Vlaams-Brabant, België.

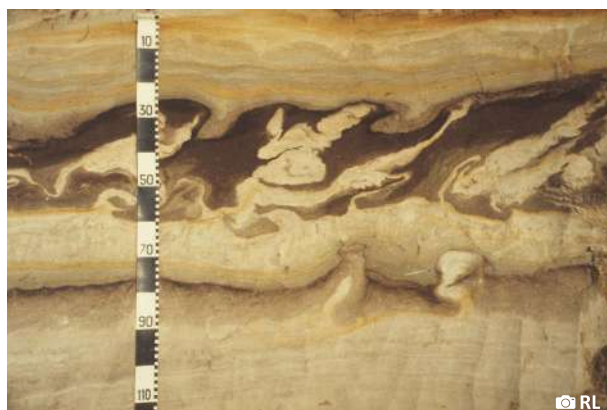


Fig. E106: Een bodem met een zwarte, venige oppervlaktehorizont volledig vervormd door solifluctie (i.c. gelifluctie), met de typische lobben. Kempen, België.



Fig. E107: Steile helling met actieve solifluctielobben (i.c. gelifluctie) op ongeveer 2.200 m hoogte. Sierra del Cadi, Cerdanya, Spanje.



Fig. E108: Actieve solifluctielob in een gebied met permafrost. Dempster Highway ten zuiden van Inuvik, Yukon, NW Territoires, Canada.



Fig. E109: Voorbeeld van kryoreptatie met de grootste stenen aan het einde van de afzetting. Cap del Rec, Lles, Cerdanya, Spanje.

5.4. Grondverschuiving of grondvergliding

(grondverschuiving, aardverschuiving, verglijding)

(En.: *slide, landslide*)

De milieucondities voor het veroorzaken van een grondverschuiving zijn dezelfde als deze voor solifluctie, maar hier overschrijdt het gewicht van de waterverzadigde grond de schuifweerstand van een minder doorlatend substraat dat een breukoppervlak wordt. Zo'n event verloopt veel sneller, heeft een grotere dimensie en houdt een groter gevaar in dan de tot nu beschreven processen. De bodemvolumes die hier bewegen, zijn zeer variabel en variëren van enkele kubieke meter tot een hele hellingswand (figuren E110, E113, E114). Ook de afgelegde afstanden zijn zeer divers, variërend van enkele meters tot honderden meters. De grond verplaatst door een grondverschuiving, is uiteraard verstoord, maar soms staan de bomen nog steeds recht, zij het minder verticaal dan oorspronkelijk (figuur E114).

Sterk hellende gebieden met in de ondergrond smectietrijke (zwellende) kleien onder zandige lagen, zoals in de Vlaamse Ardennen, vertonen vaak een onregelmatig bodemoppervlak vanwege de talrijke grondverschuivingen die hier gebeurd zijn. In deze regio kon tijdens het Holoceen dit hellingsproces zelfs onder bos plaatsvinden en is het nog steeds actief (Van Den Eeckhout *et al.*, 2012). De ontbossing heeft echter als gevolg dat er veel meer regenwater in de bodem dringt waardoor dit proces nog sneller kan verlopen (figuren E113, E114). Ook archeologische structuren met een heuvellichaam kunnen grondverschuivingen ondergaan, vooral als ze zijn opgebouwd met lagen aarde die evenwijdig aan de helling liggen (figuur E110) in plaats van met horizontaal aangebrachte lagen zoals de Romeinen deden voor de constructie van *tumuli* (figuren E111, E112).

Grondverschuivingen (figuren E110-E114)



Fig. E110: De 'Leeuw van Waterloo'. Blijkbaar heeft men tijdens de constructie van het monument, lagen aarde gestort die evenwijdig liggen aan de helling van 25°. Hierdoor kan in een periode van hevige neerslag een glijvlak ontstaan wat de kans op grondverschuivingen vergroot. Braine-l'Alleud, provincie Waals-Brabant, België.

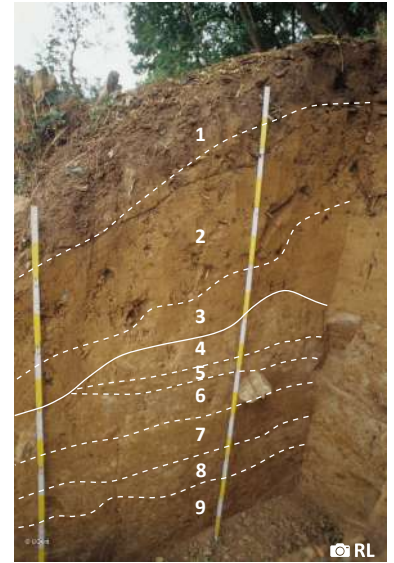


Fig. E111-E112: Romeinse *tumulus*. Om hun *tumuli* te vrijwaren van grondverschuivingen, zelfs bij sterke regenbuien, werd de aarde aangebracht in horizontale lagen van een paar decimeter dik die na het storten telkens aangestampd werden (fig. E112). Horizonten 4-9 zijn verschillende ophogingslagen die horizontaal zijn aangelegd en de kern van de heuvel vormden, deze kern is bedekt met opeenvolgende afdeklagen (horizonten 1-3). Leemstreek, Glimes, provincie Waals-Brabant, België. (Langohr, 2009b).



Fig. E113: Een grondverschuiving door de aanwezigheid van een kleisubstraat onder ongeveer 1 m löss. Leupegem, Vlaamse Ardennen, provincie Oost-Vlaanderen, België.

Fig. E114: Een grondverschuiving in de Vlaamse Ardennen, waarbij meerdere meters löss afschuiven over het tertiair kleisubstraat. De bomen van het bos staan schuin door de grondverschuiving. Hekkebrugstraat, Leupegem, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Langohr & Poesen, 2007).



5.5. Vloeien - Modderstroom

(En.: *flow, mudflow*)

Zeer poreuze en waterverzadigde bodems kunnen beginnen vloeien en veranderen in een modderstroom. De interne samenhang van de bodem blijft hierbij niet bewaard. De snelheid en de afgelegde afstand van het materiaal hangen af van de helling en van het volume van de vervoerde modder. In Vlaanderen trad dit hellingsproces op tijdens de IJstijd, meer bepaald in de Jonge Dryas. In het Meerdaalwoud zijn er zo een reeks duidelijke sporen van reliëfinsnijdingen op hellingen van amper enkele graden. Vermoedelijk hebben deze processen plaatsgehad toen de dooi een ijsrijke permafrost bodem bereikte (Langohr, 2008: 35) (figuren E115-E119).

Modderstromen (figuren E115-E119)



Fig. E115-E117: Voorbeelden van plotse erosie onder de vorm van een modderstroom door de uitzonderlijke diepe dooi van permafrost op sites met ijsrijke permafrost. Dit proces kan plaatsgrijpen op sites met zeer zwakke hellingen (amper enkele graden) en wordt beschreven als dooidepressies (En.: *thaw slumps*, Washburn, 1979: 270). Oevers van de Arctische Oceaan ter hoogte van Tuktoyaktuk, ten noorden van Inuvik, Yukon, NW Territories, Canada.

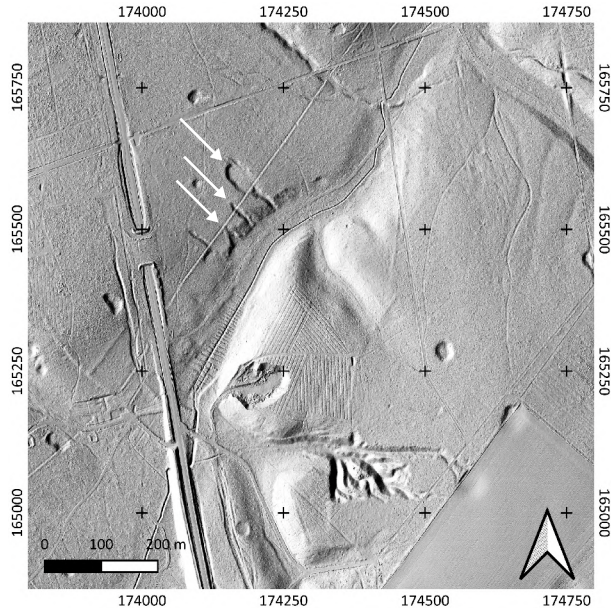


Fig. E118-E119: Voorbeelden van oude modderstromen (pijlen in fig. E118 en omlijning in fig. E119) in de zuidoostelijk gerichte valleiwanden van het bosreservaat Pruikenmakers. Meerdaalwoud, Oud-Heverlee, provincie Vlaams-Brabant, België. (Langohr, 2008: 35). Deze vorm van erosie is vooral waargenomen in de bossen gelegen in het oostelijk deel van de leemstreek, zoals bijvoorbeeld in het Meerdaalwoud of Bertembos. In het westelijk deel van de leemstreek zoals bijvoorbeeld in het Zoniënwoud, Tournay-Solvaypark of in Bos Ter Rijst is dit weinig geobserveerd. (© Digitaal Vlaanderen).



6. Winderosie

Droge zandbodems met veel bodemdeeltjes tussen ongeveer 80 en 100 μm en die weinig organisch materiaal bevatten, zijn gevoelig voor winderosie. Dit komt door het gebrek aan kleeftkracht tussen de droge korrels (figuren E120-E126). In vochtige toestand bestaat er wel cohesie tussen de korrels zoals te zien bij het maken van zandkastelen. De kustduinen en landinwaarts de stuifzandafzettingen van de Antwerpse en Limburgse Kempen, tonen het belang van actieve erosie/sedimentatie door wind. Pseudozanden, zoals glauconietzand (een groene tertiaire afzetting) dat uit klei is opgebouwd, kunnen eveneens eroderen door wind (zie thema 'Bodem-

kleur'). Korrels met een diameter groter dan 100 μm worden te zwaar om gemakkelijk losgemaakt (deflatie) en getransporteerd te worden. Kleinere korrels zoals leem en klei hebben een veel sterkere kleeftkracht, zelfs in droge toestand. Winderosie is hier wel mogelijk op voorwaarde dat leem en klei voorkomen onder verpulverde vorm, zoals het geval is op bewerkte, droge akkers. De catastrofale '*dust-bowl*' in de leemstreek van de Verenigde Staten, is hiervan een mooi voorbeeld.

Winderosie en sedimentatie (figuren E120-E126)



Fig. E120: Winderosie door het verpulveren van de bodemkluiten bij droog weer. Baringo, Rift Kenia.



Fig. E121-E122: Winderosie op ingezaaid maisperceel, kiemplantjes zijn grotendeels bedolven door het verplaatste zand, 14 juni 2020. Varsenare, provincie West-Vlaanderen, België.

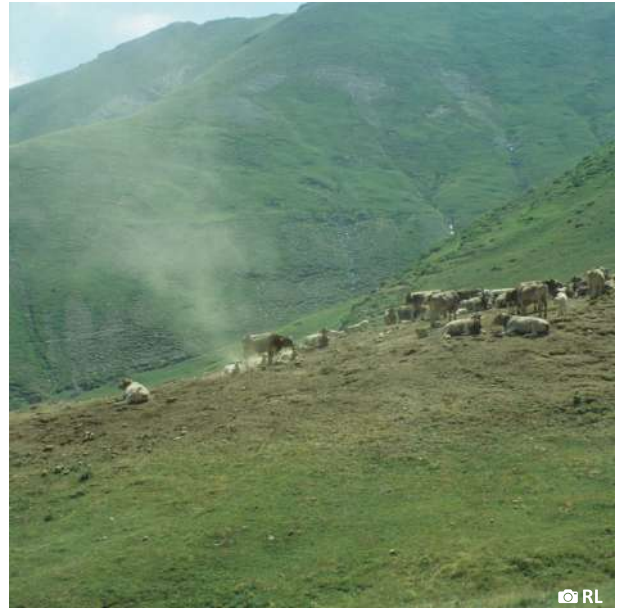


Fig. E123: Rustplaats van runderen en schapen. De vernietiging van de vegetatie verhoogt het risico op erosie door regen of, zoals hier, door wind. Cerdanya, Spanje.



Fig. E124-E126: Winderosie op de archeologische site van Aalter-Woestijne, provincie Oost-Vlaanderen, België. Door de vorst is de oppervlakkige bodem kurkdroog wat de kans op winderosie verhoogt.



Vandaag is winderosie op de leembodems van België eerder beperkt. Winderosie komt vooral voor in Vlaanderen, waar zandbodems wijdverspreid zijn. Het zijn vooral akkers die blootliggen of als ze pas ingezaaid zijn in het voorjaar, die het meest gevoelig zijn voor winderosie (Van Kerckhoven *et al.*, 2009). Het grootste risico voor verstuiwingen zijn de momenten wanneer er na een droge periode, waarbij vooral het bovenste deel van de bodem is uitgedroogd, een sterke wind opkomt. Hierdoor is er verlies aan organisch materiaal of kunnen kiemplanten bedolven worden. Negatieve sporen zoals greppels of grachten kunnen volledig worden opgevuld met stuifzand. Winderosie kwam vroeger ook

voor in zones waar het vee (schapen) zich frequent verplaatste van het dorp (boerderij) naar het graasgebied zoals de heide (figuren E127-E130). Zo kon een nieuw duinlandschap ontstaan, opgebouwd met 'stuifzanden'.

Ook vorst kan leiden tot winderosie. Hiervoor moet het bodemoppervlak blootliggen. Het vocht aanwezig in de bodem bevriest en door ijssegregatie worden kleine aggregaten gevormd. Aangezien de bodem uitzonderlijk 'droog' geworden is (alle vocht is veranderd in ijs), kan er winderosie van de microaggregaten ontstaan (figuren E124-E126).

Zandbodem vertrappeld door vee gevolgd door winderosie en sedimentatie - bodemsleuf op het SCK CEN Research Centre in Mol, provincie Antwerpen, België (figuren E127-E130)



Fig. E127: Rechterkant van de ontsluiting van beneden naar boven: (1) Usselo-bodem gevormd tijdens de Bølling en Allerød periode in laatglaciale dekzanden (zie detail fig. E128); (2) holocene humus-ijzerpodzolbodem gevormd in laatglaciale dekzanden begraven door (4) stuifzanden. (Beerten, 2019). Linkerkant van de ontsluiting: (3) laatglaciale dekzanden (zie details fig. E129, E130); de Usselo- en podzolbodem zijn volledig weggeërodeerd en later begraven onder stuifzanden.

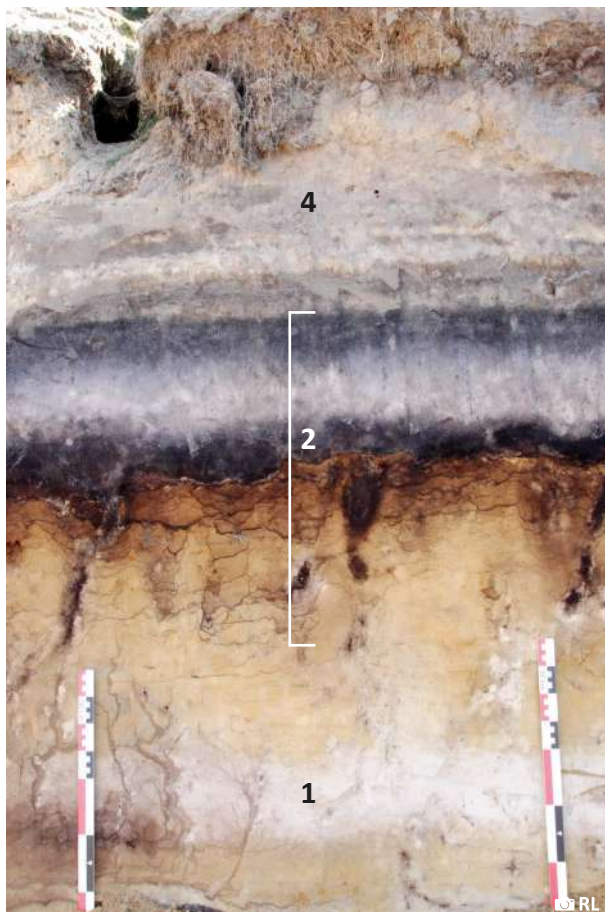


Fig. E128: Detail van de Usselo-bodem (1) en de humus-ijzerpodzol (2).

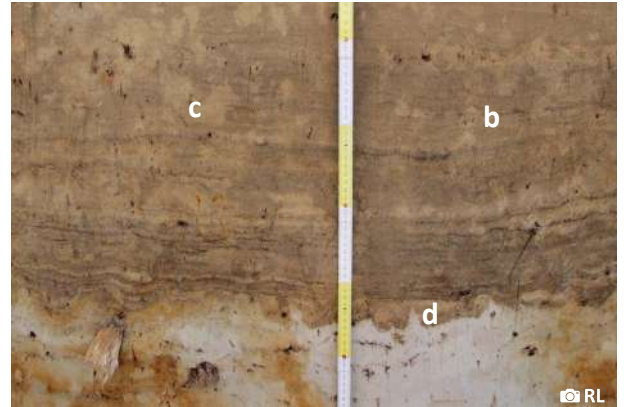


Fig. E129-E130: Detail van de laatglaciale dekzanden (3) en de stuifzanden (4) van elkaar gescheiden door een erosieoppervlak (a). Betreding door schapen en mensen tastten het vegetatiedek aan en de bodem werd vatbaar voor deflatie. Het erosieoppervlak verloopt horizontaal, omdat de winderosie gestopt is ter hoogte van het vochtig zand (vochtig door de capillaire opstijging vanuit de grondwatertafel). De stuifzanden tonen sporen van stratificatie (b) en plaatselijk lichtere vlekken (c) door de microbiologische vertering van humusstoffen. Fig. E130 toont het erosieoppervlak met sporen van vertrappeling door kleinvee (d).

7. Andere vormen van erosie

7.1. Bewerkingserosie

(En.: *tillage erosion*)

Bewerkingserosie is de netto hellingafwaartse beweging van bodemmateriaal bij het bewerken van de bodem op hellende percelen (Lindstrom *et al.*, 2001). Bijna elk type grondbewerking op glooiend terrein zal resulteren in een hellingafwaartse verplaatsing van de aarde. Het lijkt allemaal voor de hand liggend, maar het was pas in de jaren 1980 dat dit proces aandacht kreeg. Sindsdien beschouwen men dat erosie door bewerking minstens even belangrijk is als erosie door water (Van Oost & Govers, 2006: 605).

Experimenten met diverse ploegtechnieken om na te gaan in welke mate ze erosie veroorzaken (Van Oost & Govers, 2006), hebben aangetoond dat, zelfs wanneer men langs de hoogtelijnen ploegt, de aardkluiten zich meer hellingafwaarts bewegen dan hellingopwaarts. Deze beweging is natuurlijk nog sterker bij het op en neer ploegen op een helling.

Het is duidelijk dat de kerende ploeg, in vergelijking met een haakploeg (eergetouw, schuifploeg, zoolploeg), de bewerkingserosie sterk bevordert (figuren E131, E132). Werken met een schoffel (tuinhak) op een helling zal hetzelfde resultaat hebben, omdat de persoon hellingafwaarts staat ten opzichte van het land dat hij bewerkt, zodat hij zich zo weinig mogelijk moet bukken. Verder, hoe dieper de bodembewerking, hoe meer grond hellingafwaarts zal verplaatst worden. Natuurlijk is de afstand die deze bodemdeeltjes afleggen, naast textuur, bodemvochtigheid en humusgehalte, sterk afhankelijk van de hellingsgraad, de hellingsvorm, de configuratie van de percelen en het bodemgebruik, maar zelfs in een concave positie zal deze vorm van erosie nog plaatsgrijpen.

Bij bewerkingserosie worden ook grove elementen (grind, artefacten) stelselmatig hellingafwaarts verplaatst. Ze zijn niet georiënteerd noch gesorteerd, dit in tegenstelling tot erosie en sedimentatie door water (figuren E133-E135). Het is belangrijk om als archeoloog zo'n afzetting door bewerkingserosie te herkennen.

Ploegen, onkruid en braaklegging van de grond

Veelvoorkomende argumenten om de grond te ploegen zijn het bevorderen van het opnemen van meststoffen, het verbeteren van de beluchting en de structuur van de bodem en het voorbereiden van het zaaibed. Tegenwoordig wordt onkruidbestrijding zelden vermeld, want dankzij zeer effectieve herbiciden en meer recent door verbeterde technieken van mechanische onkruidbestrijding, is dit een minder groot probleem. Vóór de tijd van herbiciden en moderne landbouwtechnieken, was het onkruid echter een van de grootste zorgen van landbouwers. Onkruidvegetatie kan verder groeien wanneer ze door een of andere landbouwpraktijk is verstoord, maar niet volledig van de akker is verwijderd. Een ander probleem is de ontwikkeling van een 'zaadbank'. Dit zijn zaden die zich in de bodem bevinden en hun ontkiemingspotentieel lang behouden. Een techniek om het onkruid te bestrijden, is om deze planten korte tijd te laten groeien of ontkiemen, en het veld opnieuw te bewerken (bijvoorbeeld ploegen) voordat ze te goed geworteld zijn en zeker voordat ze opnieuw zaad produceren.

De problemen met de onoverkomelijke invasie van onkruid, biedt ook de verklaring voor bepaalde strategieën van gewasrotatie waarbij een jaar braaklegging een deel van uitmaakte. Misschien is het zelfs zo dat het verplaatsen van de boerderijen voor een stuk gebeurde in functie van onkruidbeheer. Waarschijnlijk was in sommige gevallen het verplaatsen van de boerderij naar een locatie die nog niet besmet was met onkruid en andere bodemorganismen die schadelijk zijn voor gewassen, de beste oplossing voor de boeren om te overleven in een wereld zonder herbiciden, pesticiden en fungiciden.

Een groot nadeel van een rotatiesysteem waarbij een akker een jaar zonder vegetatie werd achtergelaten, was het risico op erosie. Na de laatste oogst laat men de akker voor minstens één jaar braak liggen. Het onkruid dat zich ontwikkelde, werd verwijderd door begrazing of door een extra bodembewerking. Deze praktijk kan sterke erosie tot gevolg hebben, vooral op percelen op een helling. Volgens Pouquet (1966: 13) was dit de belangrijkste oorzaak van versnelde erosie in de 17de en 18de eeuw.

Bewerkingserosie: er vindt geen sortering plaats (figuren E131-E135)



Fig. E131: Bodembewerking op een helling met een kerende ploeg heeft als gevolg dat de bodem geleidelijk aan hellingafwaarts verplaatst wordt (hier naar links). Velika Kapela gebergte, Kroatië.



Fig. E132: Twee percelen van elkaar gescheiden door een talud van 1,5 m hoog. De onderste akker kan door bewerkingserosie met de tijd sterk geërodeerd zijn waardoor een talud gevormd is. Lamont, Kluisbergen, provincie Oost-Vlaanderen, België.



Fig. E133: Op de achtergrond, de hellingen met aanwezigheid van ondiepe bodems op kalksteen. Op de voorgrond een depressiepositie met een dik pakket licht gekleurd colluvium dat de oorspronkelijke oppervlaktehorizont begraaft (Ab) (zie fig. E134-E135). Fig. E133-E135: Verdun, departement Meuse, Frankrijk.



Fig. E134: Profiel ter hoogte van de depressie (fig. E133) met ongeveer 110 cm colluvium op een begraven oorspronkelijke valleibodem. De huidige oppervlaktehorizont (H1: A) en de B-horizont (H2) zijn ontwikkeld in het colluvium. Hieronder liggen de originele begraven oppervlaktehorizont (H3: Ahb), de begraven B-horizont (H4) en het kalkrijke moedermateriaal (H5).

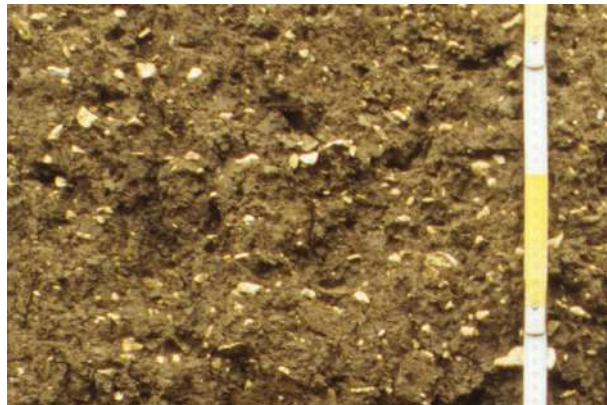


Fig. E135: Het colluvium bevat talrijke kalksteenfragmenten die tot enkele centimeters groot kunnen zijn. Deze stenen zijn homogeen verspreid en in alle richtingen georiënteerd, een kenmerk van bewerkingscolluvium (detail van fig. E134).

7.2. Oogsterosie

(En.: *soil loss due to crop harvesting*)

De directe grondverliezen door de verschillende oogsthandelingen, zoals transport, opslag, reiniging van het geoogste gewas, kunnen waarden bereiken van één enkele ton tot enkele tientallen tonnen grond per hectare en per oogst. Dit zijn waarden die vergelijkbaar zijn met die van andere vormen van bodmerosie op landbouwgrond (Ruysschaert *et al.*, 2004). De mate van deze vorm van erosie hangt af van een aantal factoren, zoals de textuur en de vochtigheid van de bodem, het type gewas, de landbouwpraktijken en de oogsttechnieken. In gematigde streken zijn vandaag aardappelen, bieten, uien, prei, asperges, wortelen en cichorei de belangrijkste

gewassen verantwoordelijk voor oogsterosie (figuur E136, E137).

Op archeologische sites kan men soms merkwaardige accumulaties van teeltaarde observeren. Op de Romeinse site te Velzeke heeft men kuilen gevuld met humusrijke aarde aangetroffen. Deze aarde kan afkomstig zijn van het schoonmaken van bepaalde groenten. Een andere veronderstelling is dat men de bovenste laag van de teeltaarde heeft begraven, omdat er een te grote zaadbank van onkruid in de bodem aanwezig was (figuren E138, E139).

Export van aarde van ploeglaag (figuren E136-E139)



Fig. E136-E137 (detail): Oogsterosie van aardappelen. Tussen de aardappelen liggen grote kluiten grond die van het perceel afgevoerd zijn. Ieper, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. E138-E139: Een diepe en brede kuil gevuld met humusrijke aarde die vergelijkbaar is met het materiaal van een ploeglaag. Blijkbaar was men niet geïnteresseerd in deze aarde die mogelijk te veel onkruidzaden bevatte. Romeinse site van Velzeke, Zottegem, provincie Oost-Vlaanderen, België.

7.3. Erosie langs paden, wegen en in groeven

Het belang van paden, wegen en groeven, wordt vaak vergeten bij het evalueren van erosie op een site. Bij de bespreking van de factoren die erosie bevorderen (§ 1.1) werd uitgelegd dat in een gematigd klimaat, een vegetatiebedekking zoals bos of grasland, de bodem beschermt tegen erosie. Toch stellen boswachters en landbouwers op dit soort terreinen regelmatig erosie vast door waterafvoer langs voetpaden, veepadten of boswegen. Het vertrappen van de bodem (zie thema 'Bodembioturbatie door dieren') door mensen of dieren, heeft een dubbele impact: er is de vernietiging van kruidachtige vegetatie waarbij het bodemoppervlak bloot komt te liggen en er is het samendrukken van de bodem, zodat infiltratie van water erg moeilijk wordt. Het is op zulke locaties dat erosie, als gevolg van menselijke activiteiten, heel vroeg in

de geschiedenis is begonnen. Voetgangers brengen de minste verstoring met zich mee, maar het wordt heel anders als kuddes schapen, runderen of paarden passeren (figuren E142, E143). Afhankelijk van het klimaat en de lengte van het tracé, kan de kracht van het water zo sterk worden dat een ravijn uitgeschuurd wordt (figuren E142, E143). In sommige gebieden noemt men dit soort insnijdingen in het landschap 'holle wegen' (En.: *hollow roads*) (figuren E173, E174). Om een natuurlijk ravijn te kunnen onderscheiden van een 'holle weg', moet men nagaan wat hun landschapspositie was op het moment van hun ontwikkeling. In tegenstelling tot natuurlijke ravijnen (zie §3.5) (figuur E5), passeert de mens bij voorkeur op plaatsen die zo droog mogelijk zijn, dus iets hoger op de helling ten opzichte van de bodem van de oorspronkelijke depressie.

Erosie veroorzaakt door wegen in het Zoniënwoud, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België (figuren E140-E143)

Resten van een voormalige toegangsweg vanuit het zuiden (Hoeilaart, Waver...) naar Brussel (fig. E140-E141); deze weg is gelegen nabij Drie Borren (Oudergem). Ter hoogte van een redelijk steile helling heeft men een 15-20 m brede sleuf uitgegraven om de helling minder steil te maken voor het transport met karren. In het midden van de sleuf ligt een iets hoger platform met aan weerszijden een draineringsgracht. Waarschijnlijk was het platform bedekt met hout om erosie te vermijden. Deze oude weg is een mooi voorbeeld van goed bewaard archeologisch patrimonium onder een bosbestand.



Fig. E140: Oude weg ingesleten in de helling. Drie Borren, Oudergem, Zoniënwoud, België. Zicht van beneden naar boven.



Fig. E141: Zicht van boven naar beneden.



Fig. E142: Sporen van een oude weg van Bosvoorde naar de priorij van Groenendaal. (1) de uitgegraven weg met een zachte helling voor karren. (2) een reeks ravijnvormige insnijdingen veroorzaakt door verkeer van onder andere vee en ruiters. Wanneer de insnijding te diep werd, koos men ervoor een nieuw pad te volgen om te vermijden dat men in de waterverzadigde bodem zakte. Hierdoor kregen deze ravijnvormige insnijdingen een waaivorm.



Fig. E143: Een waaier van ravijnvormige wegen, vroeger gevolgd door vee en paarden (Oudergem). Deze ravijnen gaan recht op de helling en bevinden zich niet in het laagste deel van het landschap, omdat daar de bodem dikwijls waterverzadigd is.

8. Antropogene ingrepen op de topografie

In Vlaanderen zijn veel van de hierboven besproken erosievormen afhankelijk van menselijke activiteiten en dit sinds het neolithicum. Zoals vermeld, heeft de mens deze processen gefaciliteerd, voornamelijk vanwege de impact op de vegetatiebedekking. Er zijn echter talrijke erosie/sedimentatieprocessen die rechtstreeks verband houden met menselijke activiteiten. Zolang de aangelegde structuren onderhouden worden, zijn ze meestal stabiel. Maar wanneer ze in ongebruik geraken, zijn ze onderhevig aan erosie/sedimentatie. Een aantal van deze vormen worden hierna besproken.

8.1. Terrassen

De aanleg van terrassen, zoals voor wijnstokken, verandert de morfologie van het bodemoppervlak in belangrijke mate (figuren E144-E149). Op oude Vlaamse lithografieën ziet men dat wijngaarden vroeger veelvuldig voorkwamen op hellingen met hoofdzakelijk zandige bodems. Helaas zijn de sporen van dit microreliëf meestal verdwenen door latere menselijke ingrepen en activiteiten. Het is slechts onder permanent bos dat deze structuren nog kunnen geobserveerd worden (figuren E144-E149).

Terrassen aangelegd door de mens in het Zoniënwoud, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België (figuren E144-E149)

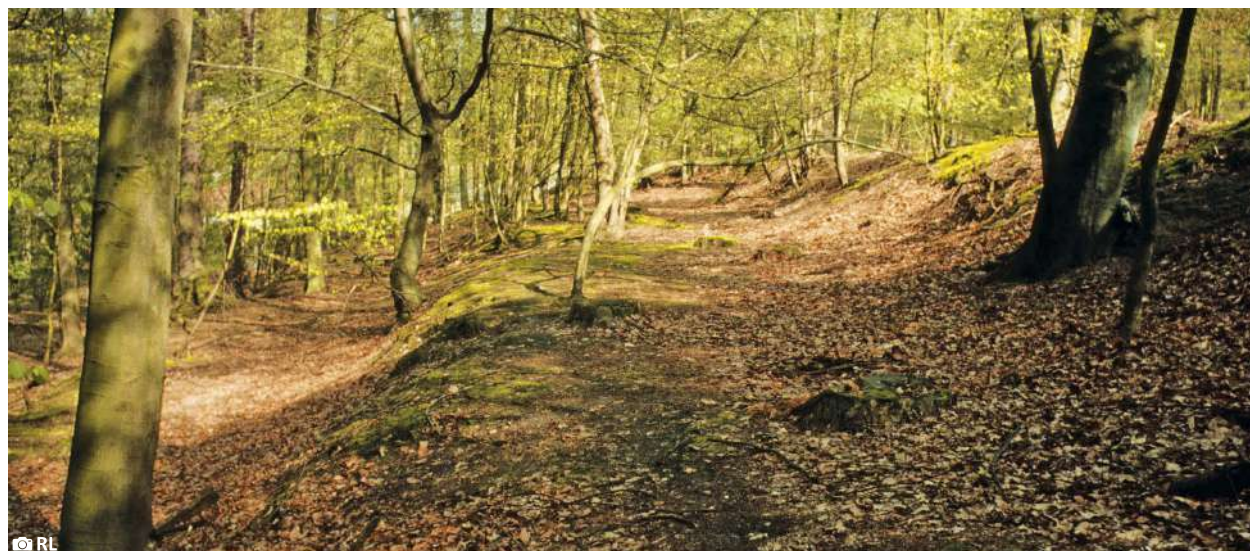


Fig. E144-E145: Smalle (fig. E144) en brede (fig. E145) terrassen aangelegd op de helling ten zuiden van de priorij voor siertuinen en mogelijk voor akkerbouw. Priorij van Groenendaal.



Fig. E146: Terrasjes aangelegd voor wijnbouw op een zuidgerichte helling op een zandbodem. Waarschijnlijk dateren ze van de 13de-15de eeuw. Rood Klooster, Tervuren.

Fig. E147-E149: Terrassen voor akkerbouw aangelegd ter hoogte van zand- en kalkzandsteengroeven. Rood Klooster, Tervuren. Fig. E147: Een groeve op de voorgrond met links en rechts terrassen. Op de achtergrond, gebouwen van het klooster in de vallei. Fig. E148-E149: Zijaanzicht van enkele terrassen. Bij de ontginning van de kalkzandsteen is er veel kalkhoudend zand vrijgekomen. Later werd de groeve genivelleerd, waarschijnlijk voor akkerbouw. Deze bodem is kalkhoudend.



8.2. Aanleg van bolle akkers

Een typisch landschap voor het Waasland is de aanwezigheid van 'bolle akkers' (Ampe & Langohr, 2006) (figuren E150-E154). De bodems van het Waasland zijn zandige bodems op een substraat met een fijnere textuur die plaatselijk zelfs kalkhoudend was (Langohr, 2001). Met de aanleg van de bolle akkers wilde men de drainage en de fertiliteit van de grond verbeteren.

De aanleg van de bolle akkers, bestudeerd door Van Hove (1997), kan gesitueerd worden in de 15de–16de eeuw. In tegenstelling tot beddenbouw, waarbij de bedden elk jaar opnieuw werden gegraven, waren bolle akkers een blijvende structuur in het landschap. Reeds in het begin van de 19de eeuw werden deze structuren beschreven door buitenlandse landbouwkundigen als een merkwaardig landbouwkundig fenomeen (Schwertz, 1807-1811; van Aelbroeck, 1823; Radcliff, 1819; Lindemans, 1952:156, noot 12, in Van Hove, 1997).

Tijdens de bodemkartering, eind jaren 1950, werd het aantal gewelfde akkers op ongeveer 35.000 ge-

schat (Snacken, 1961). De oppervlakte van deze min of meer vierkante akkers is typisch iets minder dan een hectare. Bij de aanleg van de bolle akker werden eerst de randen van het perceel afgegraven en werd een helling aangebracht. Rondom het perceel werden grachten gegraven. Met het vrijgekomen materiaal werd op het oorspronkelijke oppervlak een koepelvorm aangelegd. Dit verzekerde een betere afwatering van het perceel. De grond uit de grachten was soms iets lemiger wat het waterophoudend vermogen van de bodem op de akker verbeterde. Vandaag zijn de bolle akkers sterk vervlakt en bedraagt het hoogteverschil, tussen het centrale deel van de akker en de rand, 50 tot 100 cm (Langohr, 2001). Het hoogteverschil bij de typische bolle akker tussen het centrum van de akker en de rand was oorspronkelijk veel meer uitgesproken en bedroeg 120-160 cm (Snacken, 1961). Het hoogteverschil tussen het opgehoogde centrale deel en de grachtbodem kon uiteindelijk 3-3,5 m bedragen (Van Hove, 1997: 303) (figuren E151-E152). In extreme gevallen kon de hoeveelheid verplaatste aarde tot 5.500 m³ per hectare bedragen (Van Hove, 1997: 307). Dit cijfer is wellicht aan de hoge kant, maar men kan wel aannemen dat per akker enkele duizenden kubieke me-

Erosie/sedimentatie bij de aanleg van de bolle akkers (figuren E150-154)



Fig. E150: Hedendaagse bolle akkers, met populieren ter hoogte van de grachten. Land van Waas, provincie Oost-Vlaanderen, België.

ter per hectare werden verplaatst. Aan de lager gelegen zijanten van de akkers is de originele bodem afgegraven en geërodeerd. Op het hogergelegen centrale deel van de akker daarentegen is vandaag nog over grote oppervlakten de originele bodem, die aanwezig was op het ogenblik van de aanleg van de bolle akker, wel nog bewaard en begraven onder de aangevoerde grond (figuren E152, E153). Het centrale deel van de bolle akkers beschermt de oudere ploeglagen en het begraven bodemprofiel dat dateert van vóór de aanleg van de akker. Dit bestaat vaak uit een ploeglaag van slechts 10-20 cm dik op een podzolprofiel. Men schat dat 60% van de archeologische sporen begraven onder bolle akkers

zeer goed bewaard is (Ampe & Langohr, 2006: 169). Dit kunnen o.a. bronstijd greppels, Gallo-Romeinse en volle middeleeuwse nederzettingssporen zijn.

Het is duidelijk dat deze uitgestrekte zone van bolle akkers, een uitzonderlijk bodemkundig erfgoed is voor het archeologisch en archeobodemkundig onderzoek.

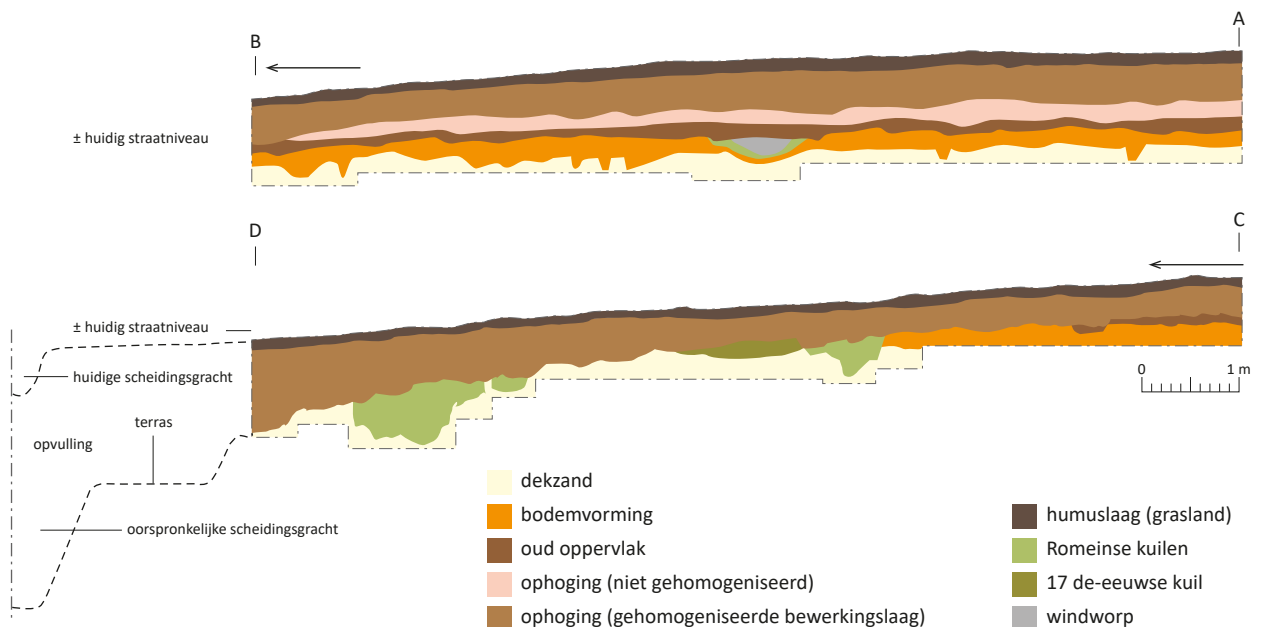


Fig. E151: Reconstructie van de originele topografie en bodemhorizonten. De huidige gracht, 50-60 cm diep, was oorspronkelijk trapsgewijs uitgegraven tot 200-280 cm diepte ten opzichte van het oorspronkelijke maaiveld. Deze aarde werd over het perceel verspreid. (Van Hove, 1997).

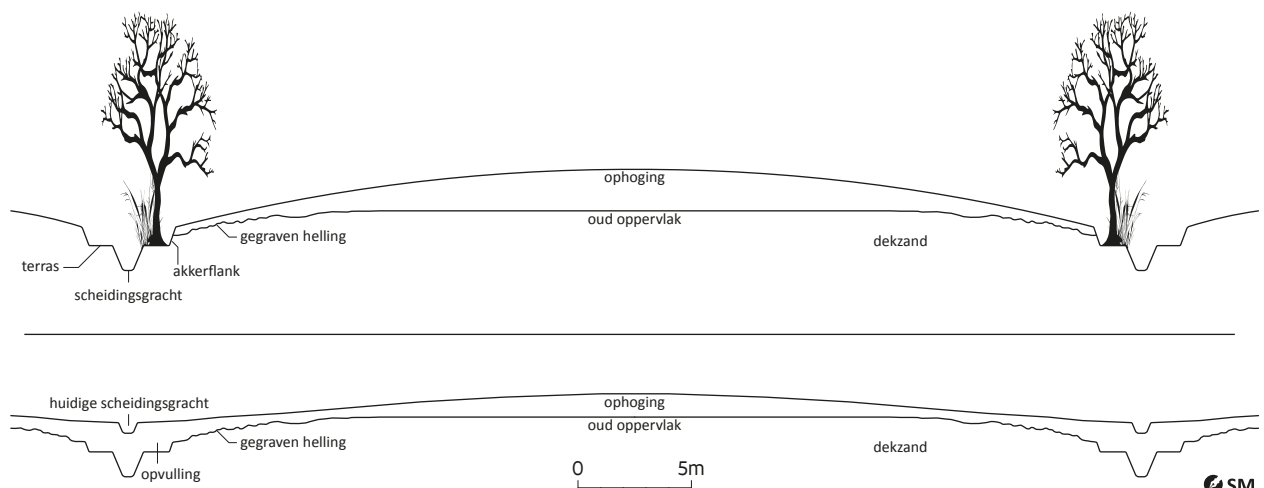
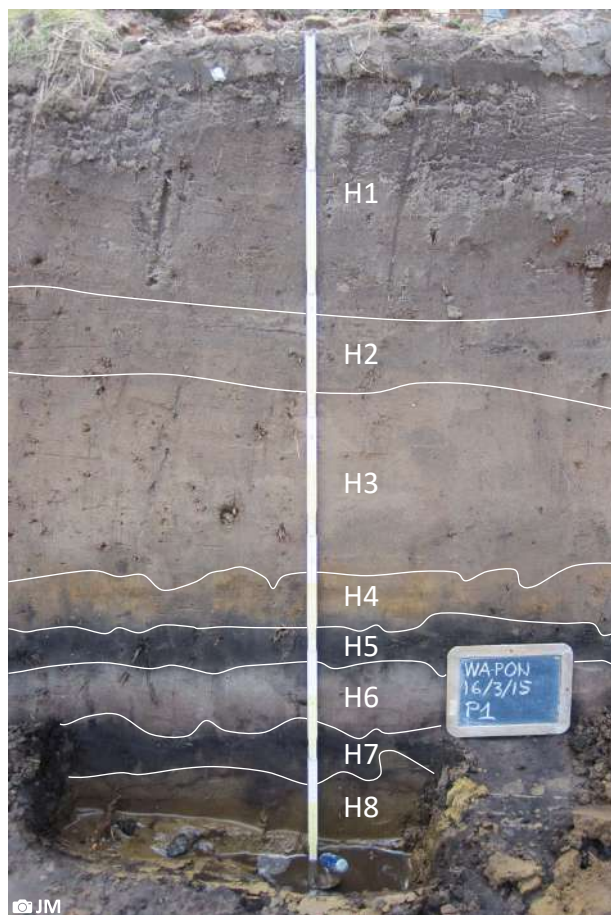


Fig. E152: Boven: originele bodemtopografie van bolle akkers. Onder: huidige topografie. (bron: Van Hove, 1997 op basis van Schwerz, 1807).



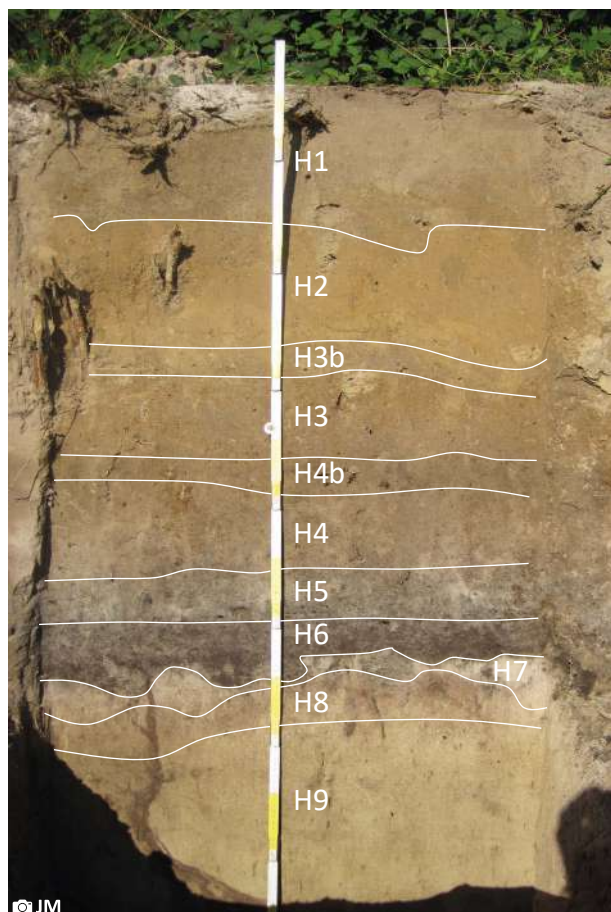
H1-H4: opgehoogd materiaal:

- H1: ^Ap1: huidige ploeglaag.
- H2: ^Ap2: tweede ploeglaag.
- H3: ^C1: niet gehomogeniseerd aangebracht materiaal.
- H4: ^C2: niet gehomogeniseerd aangebracht materiaal.

H5-H8: begraven grondwaterpodzol:

- H5: Ab: humeuze oppervlaktehorizont van de podzolbodem.
- H6: Eb: uitlogingshorizont.
- H7: Bhb: podzol humusaanrijkingshorizont.
- H8: Bhsb: podzol humus-ijzeraanrijkingshorizont.

Fig. E153: De oorspronkelijke podzolbodem (H5-H8) is begraven door het aanleggen van een bolle akker. De bodem is vermoedelijk in 2 of 3 fasen opgehoogd met de horizons H4, H3 en H1-H2. Het bewerken van de bodem veroorzaakte erosie op het hoger gelegen deel van de akker en sediment werd hellingafwaarts afgezet. Door het ophogen van de bodem, ligt het diepste deel van de ploeglaag (H2) niet langer binnen het bereik van het ploegen. Waasmunster, provincie Oost-Vlaanderen, België.



H1-H4: opgehoogd materiaal:

- H1: ^Ap: huidige ploeglaag in derde fase van ophoging.
- H2: ^B1: kleur B-horizont.
- H3b: ^A1: oppervlaktehorizont van de tweede fase van ophoging.
- H3: ^B2 : kleur B-horizont.
- H4b: ^A2: oppervlaktehorizont van de eerste fase van ophoging.
- H4: ^B3 : kleur B-horizont.

H5: B: colluvium.

H6-H9: begraven bodem:

- H6: Ab: oppervlaktehorizont.
- H7: Eb: uitlogingshorizont.
- H8: B(h)b: zwak ontwikkelde humusaanrijkingshorizont.
- H9: BC: moedermateriaal, dekzand.

Fig. E154: Begraven bodem met een oppervlaktehorizont (H6) en een bleke uitlogingshorizont (H7) bovenop een zwak ontwikkelde B-horizont (H8). H5 is vermoedelijk colluvium dat over een korte afstand van de hoger liggende A- en E-horizonten (profielinversie) is aangevoerd. De bolle akker is wellicht 3 keer opgehoogd (H4, H3 en H1-H2). Telkens ontwikkelde er zich tijdens een korte periode van stabilisatie een oppervlaktehorizont (H3b en H4b). Mierenneststraat, Sint-Niklaas, provincie Oost-Vlaanderen, België.

8.3. Het afsteken van plaggen

In de Kempische zandstreek werden zoden van humusrijke oppervlaktehorizonten ('plaggen') van heide, bossen en moerassen afgestoken en naar de stal gebracht (Langohr, 2001). Het vee vertrappelde deze zoden en de aarde vermengde zich met de uitwerpselen en de urine van het vee. Later werd dit mengsel als mest op de akkers gebracht. Deze methode zou volgens Spek (1992) in de Kempen al vanaf het begin van de 13de eeuw toegepast zijn. Sommige archeologen suggereren dat plaggenbemesting reeds bestond in de Romeinse periode, maar recent archeobodemkundig onderzoek van twee Romeinse 'potstallen' wijst eerder op een techniek van stalbeheer en niet van plaggenbemesting (Mikkelsen *et al.*, 2019).

Door het langdurig toepassen van de plaggenbemesting op de akker, ontstond er een bodem met een bijzonder dikke humusrijke oppervlaktehorizont (Bastiaens, 1994). Deze bodems, vooral aanwezig rond de dorpskernen, zijn duidelijk afgebakend op de bodemkaarten van de Kempen en aangeduid met 'm' voor het profielontwikkelingssymbool (Mikkelsen *et al.*, 2002: 60-63). Niet zelden is de originele bodem onder de plaggenbodem bewaard geble-

ven (figuur E159). Helaas zijn uitgebreide zones van deze bodems ondertussen zo goed als volledig verdwenen onder druk van toenemende bebouwing na de Tweede Wereldoorlog (figuur E158).

Een negatief aspect van deze bemestingsmethode was dat door het afplaggen, uitgebreide zones van zandbodems ontstonden zonder de humusrijke oppervlaktehorizont, wat het risico op winderosie vergrootte.

Vroeger was verschraling en erosie van de bodem een neveneffect van het plaggen. Tegenwoordig wordt plaggen of soms het afgraven van de volledige ploeglaag tot 30 cm diepte doelbewust toegepast voor het beheer van erfgoedlandschappen en natuurherstel. Met het afvoeren van de oppervlaktehorizonten worden stikstof en fosfor verwijderd. Zo bekomt men een voedselarme uitgangssituatie van de bodem, zodat bijvoorbeeld heide en heischrale graslanden zich kunnen herstellen (figuren E154-E156). Bij de uitvoering van deze grondwerken is het belangrijk dat er steeds een archeologisch vooronderzoek plaatsvindt, eventueel gecombineerd met een landschappelijke boringen.

Hedendaagse voorbeelden van het 'plaggen' van bodems (figuren E155-159)



Fig. E155: Opslag van de geplagde humus- en nutriëntrijke oppervlaktehorizont. Averbode, provincie Vlaams-Brabant, België.



Fig. E156: Geplagd perceel. De resten van greppels horen bij een systeem van rabatten, een afwisseling van greppels en hogere ruggen. Het afplaggen moet de ontwikkeling van heide of heischrale graslanden bevorderen. Plaatselijk wordt er soms tot 30 cm en meer afgegraven (wat overeenkomt met de vroegere ploeglaag...). Averbode, provincie Vlaams-Brabant, België.

Fig. E157: Geplagde oppervlaktehorizont op een voethelling waar voordien verschillende grassoorten domineerden. Het doel is het uitbreiden van struikheidevegetatie, zoals dit al op de helling zichtbaar is. Maasmechelen, provincie Limburg, België.



Fig. E158: De plaggenbodems worden voor dorpsuitbreiding volledig afgegraven. Provincie-Limburg, België.



Fig. E159: Plaggenbod, 65 cm dik, op een nog goed bewaarde podzolbod. Zonhoven, provincie Limburg, België.

8.4. Rabattensysteem

Veel bossen in Vlaanderen worden gekenmerkt door een rabattenstructuur: het is een afwisseling van greppels en hoger gelegen ruggen of bedden. Deze techniek werd vermoedelijk vanaf 1760 toegepast bij het ontginnen van heidegebieden voor het aanplanten van bos op terreinen die niet geschikt waren voor landbouw. In de 19de eeuw was het een gangbare bosbouwkundige praktijk, maar na de Tweede Wereldoorlog geraakte de techniek in verval (Van Driessche, 2021) (figuren E160-E163).

Het doel voor de aanleg van de rabatten werd reeds uitgelegd door verschillende auteurs in de 18de en 19de eeuw (voor een historisch overzicht zie Van Driessche, 2021). Het rabbatensysteem verbeterde de waterhuishouding van het terrein: de greppels tussen de rabatten ontwateren de natte gronden en zorgen voor een betere drainage, de ruggen zelf worden kunstmatig verhoogd. Vermoedelijk was dit echter niet de enige reden: rabbatensystemen werden aangelegd op zowel natte en vochtige als droge gronden. Rabatten vergemakkelijkten eveneens

de exploitatie zoals bijvoorbeeld het wieden van de bedden en de afvoer van het snoeihout. Andere voordelen zijn dat bij het opwerpen van de grond op de ruggen, het beschikbare bodemvolume voor de planten vermeerderd zodat ze dieper kunnen bewortelen (Jansen & van Benthem, 2005). Bij de aanwezigheid van een gecementeerde podzol B-horizont werd door het graven van de greppels en het diepspitten van de ruggen, de cementatie doorbroken (veldobservaties R. Langohr).

Bij de aanleg van de rabattenstructuur werden in een eerste fase van ontginning, de ruggen soms ook als smalle akkers gebruikt met het inzaaien van rogge en boekweit (Anon., 2011 in Van Driessche, 2021). Dikwijls werd een rotatie van bos (soms als hakhout) met akker doorgevoerd. De strooisellaag werd ingeploegd en vormde een deel van de bemesting voor de bodem. Vanuit de greppels werd organisch materiaal en slib verzameld, wat gebruikt werd om bedden te bemesten. Erna werden bijvoorbeeld lupines en aardappelen geteeld. Na enkele jaren werd het hoofddoel opnieuw bos/hakhout. Ook beweiding is niet uitgesloten (veldobservaties R. Langohr).

De breedte en diepte van de rabattenstructuur was afhankelijk van de vochtigheid van het perceel: hoe natter hoe meer greppels, hoe smaller de ruggen. De greppelbreedte liep uiteen van 1-2 m bij een diepte van 60-70 cm. De rabattenbreedte varieerde van 1 tot 10 m.

Bij de kartering van de Bodemkaart van België worden deze gronden met het profielontwikkelingssymbool 'g' (duidelijke podzol), 'h' (verbrokkelde podzol) of 'p' (zonder profielontwikkeling) aangeduid, naargelang de profielontwikkeling die nog aangetroffen wordt onder de verstoorde A-horizont.



Fig. E160-E161: Rabattensysteem met bedden waarop eik is aangeplant en tusseninliggende greppels. Drongengoedbos, Aalter, provincie Oost-Vlaanderen, België.

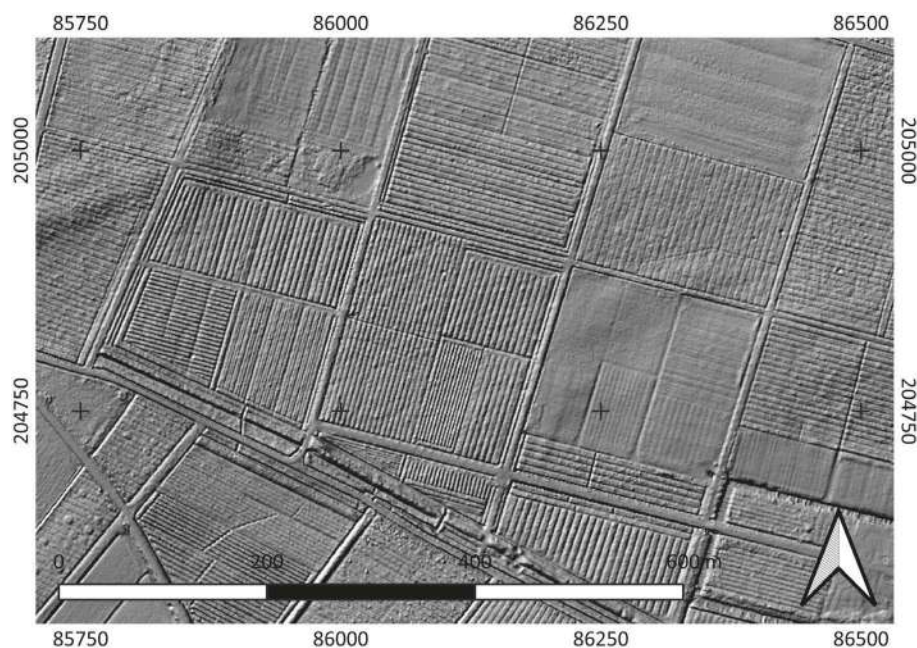


Fig. E162: LiDAR beeld van het Drongengoedbos waarop het rabattensysteem zeer duidelijk te zien is. (© Digitaal Vlaanderen).

Fig. E163: Rabattensysteem is zeer duidelijk te zien na het kappen van het bos en afgraven van de oppervlaktehorizont met de blekere ruggen en donkere greppels. Vallei van de Zwarte Beek, Beringen, provincie Limburg, België.



8.5. Graaf-, opvul-, egalisatiewerken voor landbouw, woningbouw, weg- en grafconstructies

Groeven

Grondstoffen worden voor veel verschillende doeleinden ontgonnen. De publicatie ‘Delftstoffen in Vlaanderen’ (Gullentops en Wouters, 1996) geeft een overzicht van grondstoffen en materialen die ontgonnen worden:

- keramische stoffen inclusief bakstenen (leem en klei voor productie keramiek, inclusief bouwkermiek),
- bouwzand en industriezand (glas),
- grove granulaten (grind),
- bouwsteen (ijerzandsteen, siliciumzandsteen, kalkzandsteen, krijtsteen),
- energie (turf, ligniet voor brandstof),
- ertsen uit het Krijt: krijt, cement, vuursteen, fosfaat,
- ijzererts (glauconiet, ijzererts),
- zout,
- grondwater.

In Vlaanderen zijn er anno 2025 nog zo’n 42 groeves voor zandontginningen actief. Dit gaat over kwartzand voor de glasindustrie, grovere zanden voor de betonindustrie en fijnere zanden voor aan- of op-hoogtoepassingen (schriftelijke mededeling J. Van Roo, Departement Omgeving, 2025).

Bij ontginningen van delfstoffen in groeves, kan er erosie/sedimentatie optreden op de stortplaatsen van het niet afgevoerde materiaal uit de groeve. Vroeger werd dit materiaal op de bodem van de groeve achtergelaten waar het een zeer onregelmatig microreliëf vormde. Soms werd dit stortmateriaal genivelleerd zodat het terrein opnieuw voor landbouwdoeleinden kon gebruikt worden. Zo werd kalkhoudend zand genivelleerd door de geestelijken van het Rood Klooster in het Zoniënwoud (figuren E144-E149). Vandaag is het verplicht om na het sluiten van een groeve, een eindafwerking in functie van de nabestemming te realiseren.

In het verleden werd er dikwijls zand ontgonnen voor het inrichten van de woonplaats zoals bijvoorbeeld het uitspreiden van ‘zuivere’ aarde (meestal zand) op de woonvloer en op de stalvloer. Deze ingreep laat in de bodem een typische morfologie achter van rechthoekige putten of putten met gebogen wanden (vorm van ‘bananen’ – mondelinge mededeling van J. Bourgeois, UGent) die voldoende diep zijn om de diepere, humusvrije (‘steriele’) aarde te ontginnen. Na de ontginning werden deze putten gevuld met de oppervlakkige humuslaag (meestal een ploeglaag). De hoeveelheid ontgonnen aarde komt ongeveer overeen met het volume van een kruiwagen (figuren E164-E166) of een kar (figuren E168, E169). Dit gebruik is vooral te observeren in de zandstreek van Noord-België. Het uitgraven van grond gebeurde ook voor de aanleg van structuren zoals wegen, wallen, mottes en *tumuli*. Dit wordt behandeld in de volgende paragraaf.

Voorbeelden van grondwinning voor de woonplaats. Ze vertonen scherpe grenzen wat wijst op een onmiddellijke vulling van de put, meestal met aarde van de bewerkingshorizont (figuren E164-E169)



Fig. E164: Typische zandwinningsputten. De voorkeur ging naar gebleekt zand, kenmerkend voor een eerder moerassig gebied. Dit wordt bevestigd door een klein restant van de venige oppervlaktehorizont helemaal rechts op de foto (pijl) (Cornelis *et al.*, 2012).



Fig. E165: Detail van een restant van de originele venige zwarte oppervlaktehorizont.



Fig. E166: Een reeks rechthoekige zandontginningsputten die scherp begrensd zijn. Dit contrasteert sterk met de sporen van twee parallelle grachten. Deze hebben minder scherpe grenzen, omdat er een periode was met vegetatiebegroeiing en bioturbatie door fauna zoals regenwormen. Fig. E164-E166: Rotselaar, provincie Vlaams-Brabant, België.



Fig. E167: Voorbeeld van een gracht met dicht begroeide stabiele hellingen en fauna activiteit. Polder, Koksijde, provincie West-Vlaanderen, België.



Fig. E168-E169: Voorbeeld van systematische zandontginningsputten met typische scherpe structuurgrens. Ekeren-het-Laar, provincie Antwerpen, België.



Wegen, wallen, mottes en *tumuli*

Onder taluds van wegen, dijken, aarden wallen en *tumuli* kunnen uitzonderlijk goed bewaarde begraven bodems liggen. Dit zijn bij uitstek de plaatsen voor de studie van referentieprofielen (figuren E18, E73-E75, E153, E154, E179, E180, E188). Het materiaal voor de aanleg van aarden wallen, dijken en mottes werd dikwijls uit grachten vlakbij deze structuren gewonnen. Op deze plaatsen kan erosie voorkomen (figuren E40-E43, E151, E152).

Paden, wegen en recreatiezones (figuren E34-E39, E170-E172) kunnen een belangrijke erosie tot gevolg hebben, vooral wanneer het wegdek niet aangelegd is met een stenen of houten vloer. Holle wegen en ravijnvormige insnijdingen zijn mooie voorbeelden van deze vorm van mens-gebonden erosie (figuren E34-E39, E140-E143, E170-E174). Er zijn natuurlijk naast het ontginnen nog andere redenen voor het uitgraven van grachten zoals drainering, eigendomsbegrenzing en militaire activiteiten.

Het winnen van aarde voor *tumuli* is verschillend in Vlaanderen naargelang de streek. In de leemstreek verkoos men om een groeve meerdere meters diep uit te graven, soms tot in de kalkrijke löss. De situering van deze groeven is zelden onderzocht. Disciplines zoals geomorfologie, sedimentologie, petrografie en bodemkunde kunnen hier helpen bij het identificeren van dergelijke ontginningsites. In de zandstreek was het niet mogelijk om heel erg diep te graven omdat los zand zeer moeilijk te transporteren is en omdat het nog moeilijker is om er een *tumulus* mee te bouwen. Daarom opteerde men ervoor om zoden te gebruiken die voldoende stevig waren dankzij de doorworteling van de oppervlaktehorizonten (figuren E175-E179). Deze methode had als gevolg dat de oppervlakkige humusrijke bodem over grote oppervlakten rond de *tumulus* verwijderd was waardoor het losse zand van de diepere horizonten blootlag, wat winderosie kon bevorderen (figuren E177, E178).

Voorbeelden van wegerosie (figuren E170-E174)



Fig. E170: Bosontginning, vooral wanneer de bodem waterverzadigd is, kan leiden tot sterke erosie. Fig. E170-E172: Zoniënwoud, Watermaal-Bosvoorde, Brussels Hoofdstedelijk Gewest, België.



Fig. E171: De bosontginning heeft hier in de bodem diepe rijsporen getrokken. De beuk (pijl), die een goed verluchte bodem nodig heeft, zal in de loop van de volgende jaren afsterven door verstikking van zijn wortels.



Fig. E172: Plaatselijk kunnen rijsporen tot 60 cm diep gaan, tot waar er een stevige horizont zoals een klei-aanrijkhingshorizont en/of een fragipan voorkomt.



Fig. E173-E174: Het is niet uitgesloten dat talrijke 'holle wegen', die veel voorkomen op de valleihellingen in de leemstreek, oorspronkelijk ten dele zijn uitgegraven om het karrentransport te vergemakkelijken. Nadien kan door waterstroming de wegbedding verder eroderen, tenzij er een bedekking van stenen en/of hout werd aangelegd (zie fig. E140-E141). Sommige 'holle wegen' zijn nu beschermd, enerzijds als cultuurhistorisch erfgoed, anderzijds voor de bijzondere fauna en flora. Door de diepe insnijding van de bodem, komt dikwijls de kalkrijke leem en ook het tertiair substraat (klei of zand) lokaal aan het oppervlak wat de biodiversiteit ten goede komt. Tervuren, provincie Vlaams-Brabant, België.



Nivellering in de zandstreek voor de uitbreiding van het landbouwareaal (figuren E175-E179)

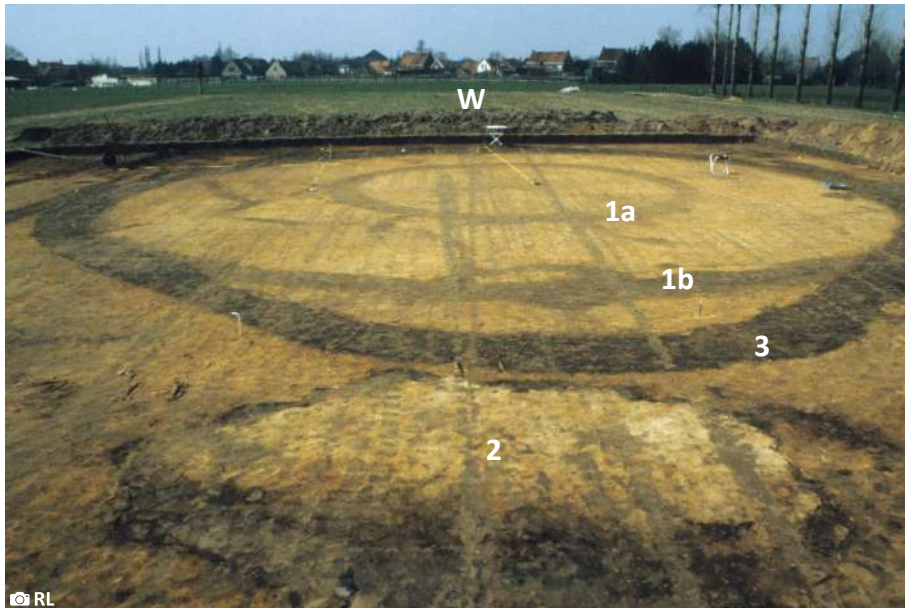


Fig. E175: Dubbele gracht (1a, 1b) geassocieerd met een *tumulus*. Ursel-Rozestraat, Aalter, provincie Oost-Vlaanderen, België.

De grafheuvel, net zoals honderden andere in Vlaanderen (De Reu *et al.*, 2011) is volledig genivelleerd. Het grote spoor (2) vooraan is van een ontwortelde boom die door wind uit het westen (W) is gekanteld. Door winderosie vanuit het westen heeft men de gracht moeten verplaatsen van 1b naar 3. Dit is nogmaals het bewijs dat er zich hier een heuvellichaam bevond, mogelijk overbegraven waardoor winderosie kon plaatsvinden.



Fig. E176: Voorbeeld van drie *tumuli*. Jutland, Denemarken.



Fig. E177-E178: Een doorsnede doorheen een tumulus uit de zandstreek, opgebouwd met zoden. Partisaensberg, Kasterlee, provincie Antwerpen, België.



H1: 0-30/40 cm: Ap1; huidige ploeglaag, regenwormgangen, maar geen sporen van mollen.

H2: 30/40-62/77 cm: Ap2; tweede ploeglaag, regenwormgangen maar geen sporen van mollen.

H3-H5: restanten van een begraven podzol.

- H3: 62/77-80/93 cm: E; oorspronkelijk lichtgrijze uitlogingshorizont, sterk gebioturbeerd door mollen.

- H4: 80/93-91/110 cm: Bh; sterk gebioturbeerde podzol B-horizont.

- H5: 91/110-118/140+ cm: C; zandig moedermateriaal.

H6: 118/140+ cm: Bt.

Fig. E179: Dit bodemprofiel lag oorspronkelijk in een iets lagere landschapspositie. De resten van een podzolbodem zijn te zien in H3-H5, maar zijn sterk gebioturbeerd. De podzolbodem is begraven onder 65 cm aarde (H1+H2). Deze grond is deels afkomstig van het nivelleren van een nabije tumulus en deels van de omgeving waarbij hoger gelegen landschapsdelen afgegraven zijn en depressies opgevuld. Gent Hoge Weg, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Pieters, 1986).

Nivelleringswerken voor landbouw

Nivelleren van landbouwgronden van de zandleem- en zandstreek is een zeer belangrijke activiteit geweest. Dit hebben vele studies van groevewanden en van proefsleufwanden tijdens talrijke archeologische opgravingen aangetoond. Globaal is de topografie vandaag zeer vlak, maar oorspronkelijk was er bij het afzetten van de dekzanden door wind een micro- en mesoreliëf gevormd. Over grote oppervlakten zat de grondwatertafel redelijk dicht bij het maaiveld. Als gevolg waren de depressieposities, dikwijls met grondwaterpodzolen of zelfs met venige bodems, te nat voor landbouw. Op de hogere landschapsposities daarentegen, was het grondwater te diep en door het laag waterophoudend vermogen van het zand, waren deze bodems

te droog. Het nivelleren liet toe het landbouwareaal aanzienlijk uit te breiden. Deze ingreep veroorzaakte een belangrijke antropogene erosie van het droger faciës van het bodemlandschap. De bodems van de nattere delen daarentegen zijn dikwijls veilig begraven onder tientallen cm aarde afkomstig van de hogere landschapsposities (figuren E179-E188). We kunnen vermoeden dat deze afvlakking ook gebeurde in de periode dat men alle *tumuli*, dikwijls gebouwd met humusrijke zoden ('goede grond') (figuren E177-E178), perfect heeft genivelleerd. Hierbij werden eveneens de bodems in lagere posities begraven (figuur E179). Deze acties waarbij het reliëf sterk vervlakt is over relatief korte afstanden, maakt een bodemkartering, zelfs met boringen om de 50-75 m, bijzonder moeilijk uit te voeren.

Nivellering in de zandstreek voor de uitbreiding van het landbouwareaal (figuren E180-E183)

Voorbeeld van nivellering van een duinlandschap te Aalter Zuid provincie Oost-Vlaanderen, België. Dankzij deze nivelleringsoperatie komt de oorspronkelijk hoger gelegen zandbodem dicht bij de grondwatertafel en ligt het bodemoppervlak van de depressiepositie nu hoger waardoor het bewerken van de gronden mogelijk wordt. De totale lengte van de topo-hydrosequentie is ongeveer 20 m.



Fig. E180: Originele depressiepositie met begraven grondwaterpodzol. De oorspronkelijke zwarte oppervlaktehorizont is nog bewaard, wat aantoont dat de nivellering niet geleidelijk maar wel in één actie is uitgevoerd. Het referentieprofiel, enkel geldig voor de slecht gedraineerde positie.



Fig. E181: Gedeeltelijk afgegraven podzol met de nog bewaarde humus-ijzer accumulatie horizont. Oorspronkelijk lag dit profiel iets hoger in het landschap dan het profiel van fig. E180.



Fig. E182: Het volledige podzolprofiel is afgegraven. De diepere gevlekte horizont is wel nog bewaard.



Fig. E183: Oorspronkelijk lag dit profiel op de hoogste landschapspositie. Vandaag is de bodem zeer sterk afgegraven.

Nivellering in de zandstreek voor de uitbreiding van het landbouwareaal, Aalter Woestijne, provincie Oost-Vlaanderen, België. (figuren E15, E16, E184-E188)



Fig. E184: De structuur met de rechthoekige sleuf (S), spoor van een Romeinse veldweg (R). De locaties van de profielen (D-G) zijn hier aangeduid, vertrekkend van oorspronkelijk de hoogste sterk geërodeerde positie (D) tot de oorspronkelijk laagste positie (G) met begraven grondwaterpodzol.



Fig. E185: De volledige originele bodem is weg, de ploeglaag ligt direct op de C-horizont (D).



Fig. E186: De podzol is volledig verdwenen maar de diepere gevlekte horizon (roestvlekken) is nog aanwezig (E).



Fig. E187: De licht gekleurde uitlogingshorizont is nog gedeeltelijk bewaard, de diepere humus en ijzeraccumulatie horizon-ten zijn nog aanwezig (F).



Fig. E188: De volledige originele grondwaterpodzol, inclusief de venige oppervlaktehorizont, is bewaard (G). Hierop liggen de huidige ploeglaag van 30 cm dik en de tweede oude ploeglaag (beddencultuur) 10/20 cm dik, met sporen van spa-desteken aan de ondergrens. De bewaring van de originele op-pervlaktehorizont wijst erop dat de nivellering in één fase is gebeurd (geen graduele erosie/sedimentatie).

9. Sedimentatie

9.1. Antropogeen colluvium

Inleiding

In de aardwetenschappen omvat de term **‘colluvium’** sedimenten en gesteenten die aan de voet van hellingen zijn afgezet door zeer diverse transportmodi zoals vallende stenen, periglaciale processen, stromend water en zelfs wind (Leopold & Völkel, 2007). Miller & Juilleret (2020) geven een overzicht van de verwarring bij het gebruik van de termen ‘colluvium’ en ‘alluvium’ in de aardwetenschappen. In de Belgische bodemkartering, is deze term restrictiever en wordt colluvium gebruikt om sedimenten aan te duiden die aan de voet van hellingen zijn afgezet als gevolg van landbouwactiviteiten. In Duitsland (Leopold & Völkel, 2007) en Tsjechië (Zadorova & Penizek, 2018) wordt grosso modo dezelfde definitie gevolgd. Dit zijn dus antropogene afzettingen die een aanzienlijke omvang kunnen bereiken. In België, in de regio van de löss (leemstreek), die plaatselijk al in de Romeinse tijd bekend was voor de productie van graan, bleek tijdens de bodemkartering dat colluviale gronden (figuren E189-E192) plaatselijk tot 20-30 % van het licht golvend landschap bedekken (bijvoorbeeld Pecrot, 1956: 195, 197). Volgens een bijgevoegde kaart bevonden zich in deze regio tientallen Romeinse villa's, Romeinse sites en *tumuli*.

De bodems ontwikkeld in colluvium, hebben een aantal gemeenschappelijke kenmerken:

- een zeer homogene korrelgrootte,
- geen duidelijk spoor van stratificatie door een continue bodembewerking (figuren E197-E199),
- afgezien van de huidige ploeglaag, een grijsbruine donkere homogene kleur (‘vuile’ kleur) (figuur E189),
- een relatief hoog gehalte aan organische stof doorheen het hele colluviale gedeelte van de bodem,
- het frequent voorkomen van fijne fragmenten van houtskool, baksteen, scherven,
- weinig of geen sporen van bodemprocessen zoals kleimigratie of podzolizatie.

De dikte van het colluvium is afhankelijk van de:

- weersomstandigheden,
- landgebruik in de tijd,
- hellingsconfiguratie en
- lengte van de helling.

Ploeglaag, colluvium en archeologie

Hoewel ploeglagen en colluviale afzettingen van antropogene oorsprong zijn, bevatten deze sedimenten relatief weinig goed bewaarde artefacten. Meestal lagen de velden vrij ver van het leefgebied en afgezien van hun gereedschap brachten boeren weinig spullen mee naar het veld. Door de bodembewerking met gereedschappen zoals een ploeg, schop, schoffel of eg, worden alle broze voorwerpen zoals keramische scherven, baksteenfragmenten en stukken houtskool voortdurend gebroken waardoor vooral ‘microlieten’ overblijven. De aanwezigheid van deze fijne elementen is een van de kenmerken van vele colluviale afzettingen.

Vrijwel alle akkers krijgen producten die van de boerderij komen, zoals drijfmest, mest, as, keukenafval, constructieafval zoals leien en pannen. Deze materialen worden op de boerderij een tijd opgeslagen op plaatsen zoals de mesthoop waar ook ander afval van bijvoorbeeld het schoonmaken of het bouwen wordt gestort. Al deze materialen worden, na hun verspreiding in de velden, in het colluvium aangetroffen. In extreme gevallen kunnen we zo bijvoorbeeld in de bodem een niveau detecteren dat overeenkomt met een periode waarin op een gebouw, enkele kilometers verderop, een leien dak werd geïnstalleerd.

In feite vertegenwoordigen de ploeglaag en de colluviale afzettingen een ‘archeologische laag’ die door archeologen nauwelijks wordt onderzocht, omdat deze horizonten zelden goed gedefinieerde antropogene structuren bevatten. Dit type archeologisch onderzoek heeft vooral zin als er een chronologie wordt onderzocht. Op sommige sites kunnen de colluviale horizonten echter de grootste concentratie artefacten bevatten (Pieters, 1990).

Sedimentaire afzettingen en het zoeken naar voormalige bewoningsoppervlakken

Erosie is voor het archeologisch onderzoek een zeer negatieve en soms ronduit catastrofale factor wanneer de structuren van een site zo goed als volledig zijn verdwenen. Men zou echter kunnen veronderstellen dat men onder de afzettingen van colluvium en alluvium uitzonderlijk goed bewaarde sites zou kunnen ontdekken. Voor alluvium wordt deze hypothese vaak bevestigd maar onder de uitgebreide colluviale sedimenten van de zacht golvende leemstreek (figuren E189-E193) observeert men vaak

onder het colluvium begraven bodems die eerst erosie hebben ondergaan voordat ze werden begraven (figuren E194-E200). Dit houdt verband met de eerste fase van erosie die het sterkst was ter hoogte van de concave voethelling waar de hoeveelheid afstromend water het grootst is. Deze zones kunnen daarom aanvankelijk erosie ondergaan, voordat de sedimenten die zich eerst in de depressie afzetten, beginnen te stijgen en uiteindelijk ook deze plaatsen bedekken. Figuur E194 (Langohr, 1990) illustreert zo'n opeenvolging die toont dat er alleen in het laagste deel een goed bewaard gebleven bewo-

ningsoppervlak kan geobserveerd worden. Figuren E195-E200 tonen een toposequentie onder colluvium dat is afgezet in een goed gedraineerde leemvallei. Ook hier wordt de best bewaarde bodem in de allerlaagste landschappositie aangetroffen (Mikkelsen & Langohr, 1996).



Fig. E189: Landbouwland in de leemstreek. De oorspronkelijke ravijnen, goed bewaard in bosbestanden (fig. E5), zijn op akkers niet meer zichtbaar door erosie van de hellingen en sedimentatie in de depressies. Het resultaat is een zacht golvend reliëf. Waver, provincie Waals-Brabant, België.



Fig. E190: Depressiepositie in oud landbouwland (leemstreek) met ongeveer 2,5 m colluvium. De pijl wijst naar het oorspronkelijk bodemoppervlak. Waremmé, provincie Luik, België.

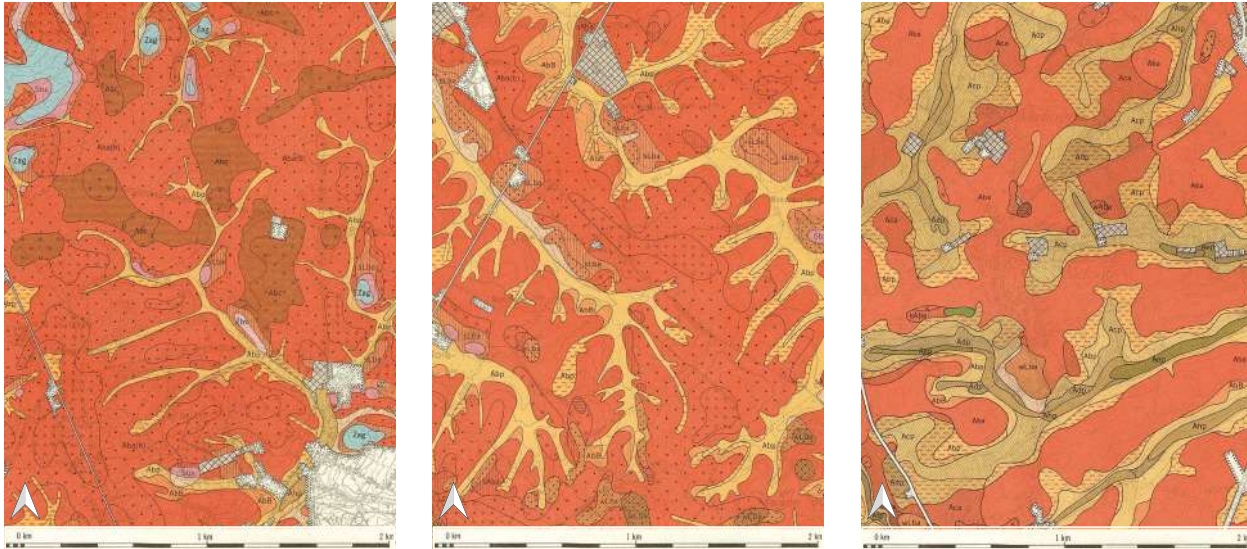


Fig. E191-E193: Verspreiding van erosie en colluvium (geel) op landbouwgronden in de leemstreek aan de hand van de Bodemkaart van België. De bodemkaart is een uitstekende proxy voor de reconstructie van de bodemgeschiedenis en de menselijke tussenkomst die geleid heeft tot colluviale afzettingen.

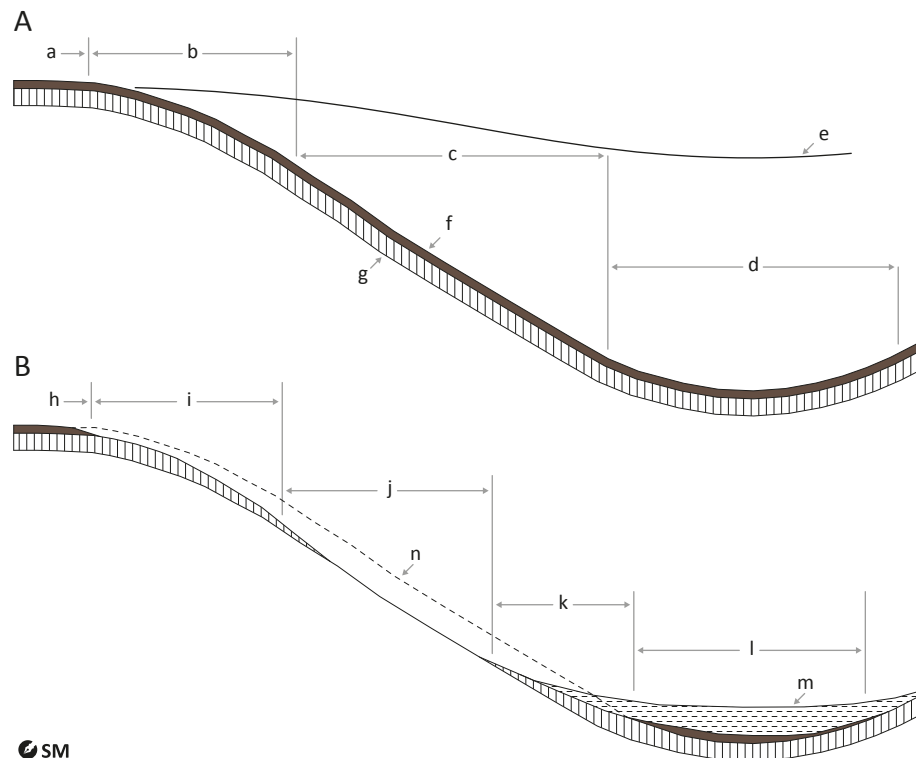
Fig. E191: Waterloo: Gebied dat ongeveer 180 jaar geleden ontbost is geweest. De donkerbruine kleur staat voor een Abc bodemprofiel, typisch voor ongestoorde bosbestanden. De lichtbruinrode kleur met zwarte punten staat voor Aba(b) bodems, een intermediair bodemtype tussen Abc en Aba. Het colluvium (geel) is hier amper aanwezig. (Bodemkaart van België, Waterloo 166W, MGI, 1958).

Fig. E192: Braine-l'Alleud: zone ontgonnen in de 13de eeuw, leem op zandsubstraat wat moeilijkheden geeft voor watervoorziening, behalve in de valleien. De oppervlakte colluvium is duidelijk groter. (Bodemkaart van België, Waterloo 166W, MGI, 1958).

Fig. E193: Ten zuiden van Sint-Pieters-Leeuw: vroeg ontgonnen gebied (minstens vanaf 7de-8de eeuw). Lichtbruinrode kleur zonder zwarte punten staat voor Aba, bodems met een klei-aanrijgingshorizont kenmerkend voor oud landbouwland. Colluviale bodems beslaan ruimschoots 30 % van het bodemlandschap (Ampe *et al.*, 2015: 314). (Bodemkaart van België, Halle 101E, MGI, 1959).

A) Reliëf vóór erosie. (a): plateau; (b): convex faciës; (c): recht faciës; (d): concaaf faciës (voethelling en valleibodem); (e): het reliëf zonder verticale overdrijving; (f): 10 cm dikke humusrijke oppervlaktehorizont; (g): 50 cm dikke uitloegingshorizont en bovenste deel van klei-aanrijgingshorizont.

B) Reliëf na erosie. (h): plateau met weinig of geen erosie; (i): bovenste convexe helling met weinig erosie; (j): rechte en bovenste deel van de concaaf helling, met sterke erosie, vooral ter hoogte van het concaaf faciës; (k): faciës waar de originele bodem eerst geërodeerd en nadien begraven onder colluvium dat geleidelijk de depressie opvult; (l): zone waar de originele bodem is begraven onder dik colluvium (m); (n): originele topografie. (Langohr, 1990).



Figuur E194: Erosie/colluvium en begraven bodems. Evolutie van het reliëf ter hoogte van een toposequentie met droge, concaaf valleibodem uit de leemstreek. Verticale overdrijving x 6. (bron: Langohr, 1990).

Colluvium en begraven bodems: over een groot deel van het gebied waar colluviale bodems voorkomen, is de oorspronkelijke bodem geërodeerd (figuren E195-E200)

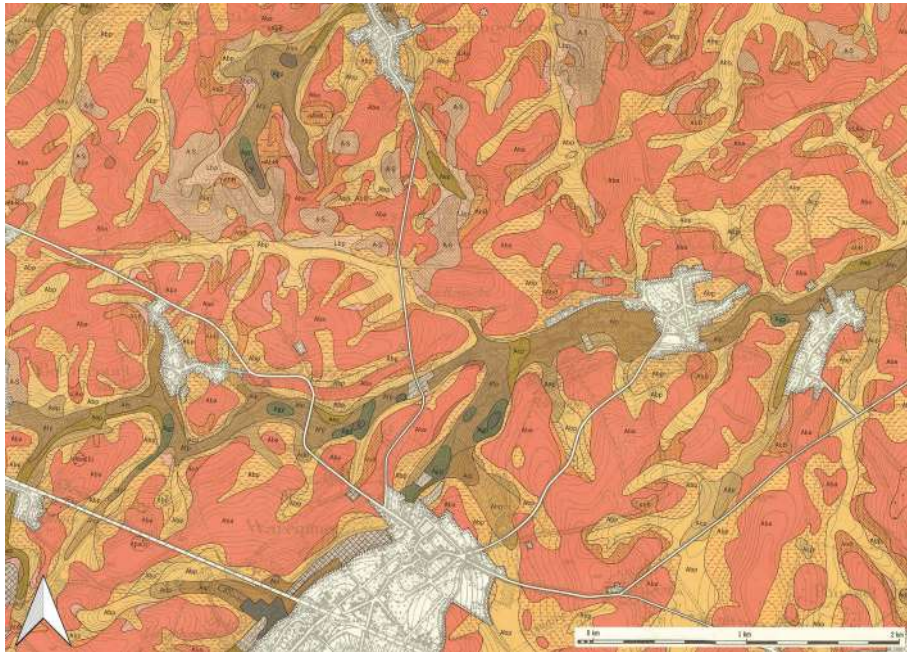


Fig. E195: Bodemkaart in de leemstreek. Geel staat voor colluviale bodems. Deze kunnen tot 30% van het bodemlandschap innemen. Slechts in een klein deel van het bodemlandschap, de allerlaagste posities, kan men een originele begraven bodem observeren. (Bodemkaart van België, Warremme 120W, MGI, 1956).



Fig. E196: Een sleuf ter hoogte van de laagste hellingspositie van een door colluvium begraven bodem, met hoger op de helling sporen van de vroegneolithische nederzetting. Aubechies, provincie Henegouwen, België. (Mikkelsen & Langohr, 1996).

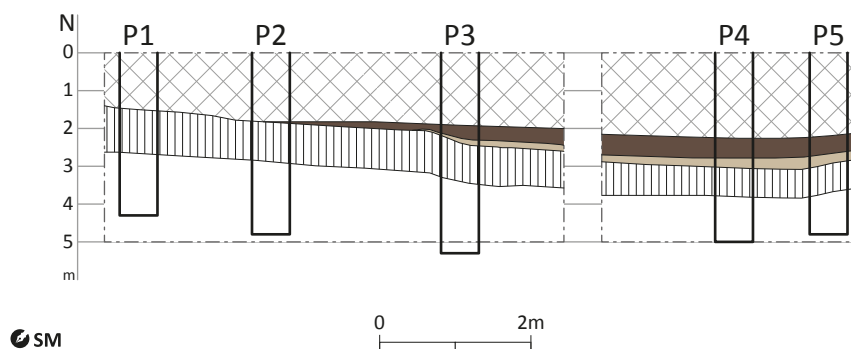


Fig. E197: Doorsnede van de 22 m lange sleuf. Donkerbruin: de originele humusrijke oppervlaktehorizont (A). Beige: de uitlogingshorizont (E). Verticale lijnen: de klei-aanrijkingshorizont (Bt). Gearceerd: colluvium.

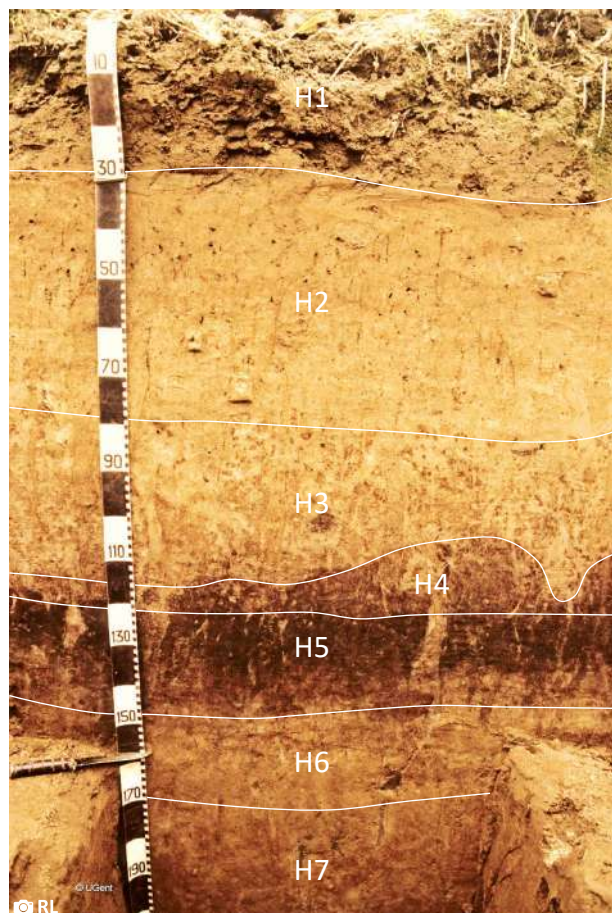


Fig. E198-E200: Drie bodemprofielen langsheen de sleuf met in de laagste landschapspositie de best bewaarde originele bodem onder het dikste pakket colluvium (Fig. E198). Meer hellingopwaarts langs de toposequentie is de originele bodem meer en meer geërodeerd en wordt het colluvium dunner (fig. E199 en fig. E200). Dikte colluvium: Fig. E198: 110 cm, Fig. E199: 95 cm, Fig. E200: 80 cm.

H1: huidige ploeglaag.

H2: colluvium zonder grondwatertafel.

H3: colluvium onder invloed van het grondwater.

H4: lichtgrijze resten van de originele humusrijke oppervlaktehorizont, geërodeerd van hoger op de helling en hier afgezet.

H5-H7: de originele bodem met H5: humusrijke oppervlaktehorizont, H6: uitlogingshorizont en H7: klei-aanrijkingshorizont.

◀ Fig. E198: De best bewaarde originele bodem onder colluvium in de laagste landschapspositie. In het colluvium zijn de originele horizonten gedeeltelijk herkenbaar met de *in situ* oppervlaktehorizont (H5) bedolven onder colluvium (H1-H4). Eerst is de oppervlaktehorizont van hogerop de helling geërodeerd en afgezet (H4), gevolgd door materiaal van de E- (H3) en de B-horizont (H2). Dit noemt men profielinversie.

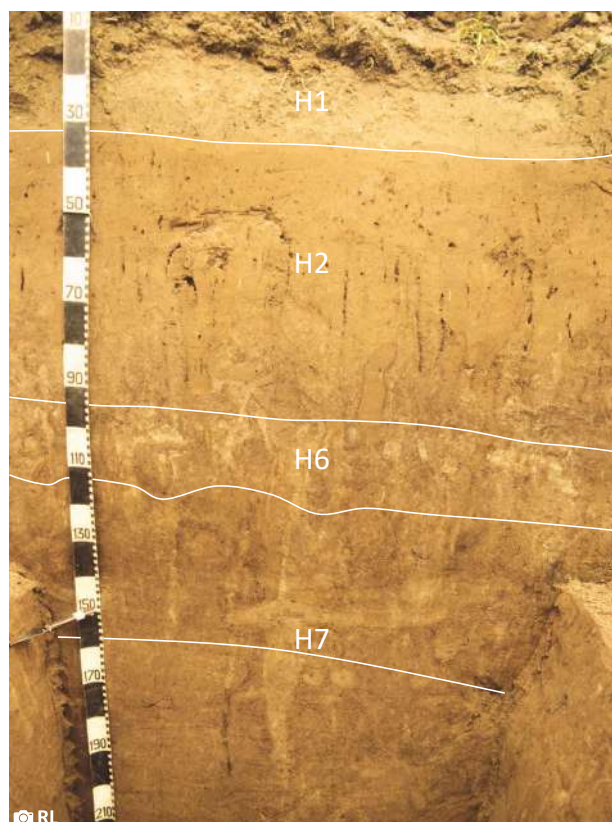


Fig. E199: De originele oppervlaktehorizont is geërodeerd, maar de *in situ* E- (H6) en B-horizont (H7) zijn nog bewaard voordat de bodem begraven werd onder colluvium.

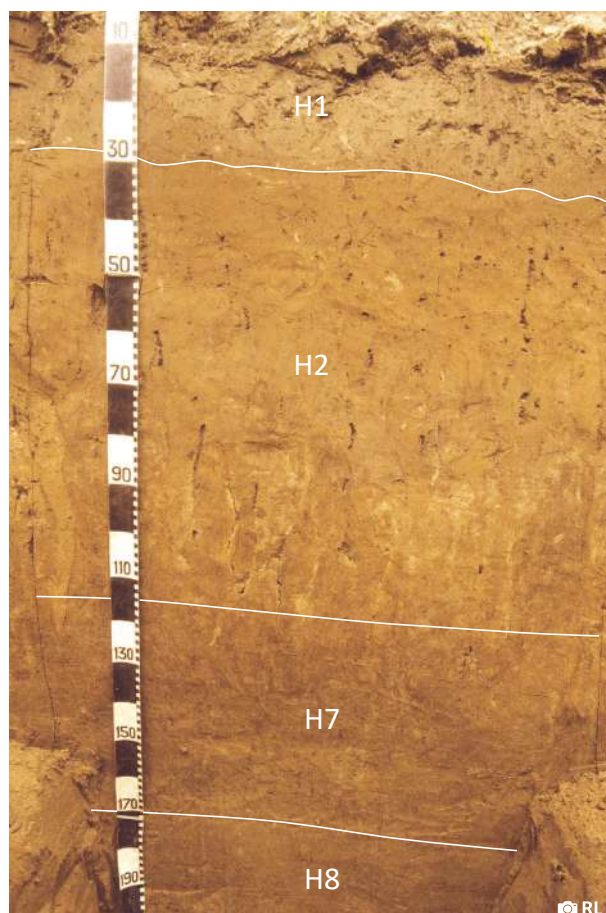


Fig. E200: Enkel de *in situ* B-horizont (H7) is nog bewaard gebleven. Nog verder hellingopwaarts is de originele bodem volledig geërodeerd.

9.2. Alluvium

Alluvium is een sediment dat wordt aangevoerd en afgezet door de overstroming van waterlopen. De morfologie van de alluviale afzettingen is afhankelijk van factoren zoals:

- het klimaat (glaciaal, periglaciaal, gematigd),
- de stroomsnelheid en het debiet doorheen het jaar,
- de aard van de getransporteerde sedimenten,
- de helling en breedte van de vallei,
- de vegetatie.

Ontbossing (meer water) en ontwikkeling van de landbouw (erosie) op grote schaal, activeerden de alluviale dynamiek. Zo zien we in de alluviale afzettingen van de Schelde een plotse overgang van venige sedimenten naar kalkhoudende minerale afzettingen. Dit betekent dat er een evolutie was van een rustig milieu met bijna geen overstromingen naar een periode met intense diepe erosie op de stroomopwaarts gelegen akkers waarbij kalkhoudende lagen werden aangesneden (figuren E89-E91). De studie van de sedimentaire kenmerken van alluvium, zoals sequenties van variërende korrelgrootte en samenstelling van het materiaal, levert dus informatie op over de evolutie van het milieu, inclusief de menselijke impact, ter hoogte van het stroomgebied.

Soms is het alluvium gestratificeerd (figuur E93), maar het is niet ongebruikelijk dat alluviale bodems weinig of geen gelaagdheid vertonen (figuur E92). De afwezigheid van stratificatie kan te wijten zijn aan twee soorten evolutie, gekoppeld aan zeer verschil-

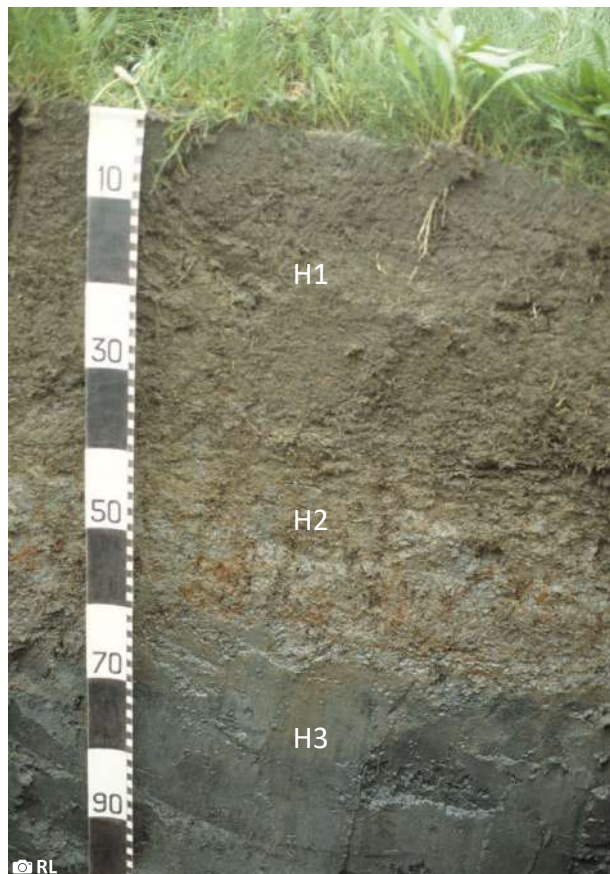
lende omgevingen. De eerste mogelijkheid is dat de oorspronkelijke sedimenten gestratificeerd waren, wat op een zeer dynamische alluviale afzetting wijst met weinig of geen vegetatie en fauna. Later, toen sedimentatie niet meer actief was, ontwikkelde er zich een bodem met een zeer specifieke vegetatie en fauna die diep in de bodem konden doordringen. Door de verschillende processen van pedogenese, en vooral door bioturbatie, is tot zelfs enkele meters diep de stratificatie geleidelijk verdwenen (zie ook discussie over homogene alluviale leembodems op de site van het Louvre, in Ciezar *et al.*, 1994). Bij de tweede mogelijkheid vindt er een vrij langzame sedimentatie plaats in een zone met een goed ontwikkelde vegetatie en bodemfauna. De bioturbatie is intens genoeg om systematisch het gelaagde karakter van de oppervlakkige sedimenten uit te wisen (figuren E201-E202).

Achteraf, wanneer bodemprofielen in de alluviale vlakte onderzocht worden, is het voor een bodemkundige niet altijd gemakkelijk om te achterhalen welke van de twee processen tot zo'n homogene bodem heeft geleid. Hier kan de archeoloog helpen. Wanneer mensen zich in de vlakte vestigden, vaak kortstondig, lieten ze er artefacten achter (figuur E203). In het eerste geval zal de positie van de artefacten in de bodem sterk beïnvloed zijn onder de impact van diepe bioturbatie. In de tweede situatie is de bioturbatie eerder oppervlakkig en zullen de artefacten zich nog steeds in hun oorspronkelijke positie bevinden.

Voorbeelden van estuariene en alluviale afzettingen (figuren E201-E203)



Fig. E201: Laagste deel van het landschap: slikken, de zone die twee keer per dag overstromt onder invloed van de getijdenwerking. Slikken vallen zo goed als droog bij laagwater en lopen onder bij hoogwater. Hoger deel van het landschap: schorren die alleen bij springtij onder water komen en begroeid zijn met een zoutminnende vegetatie. Le Hourdel, departement Somme, Frankrijk.

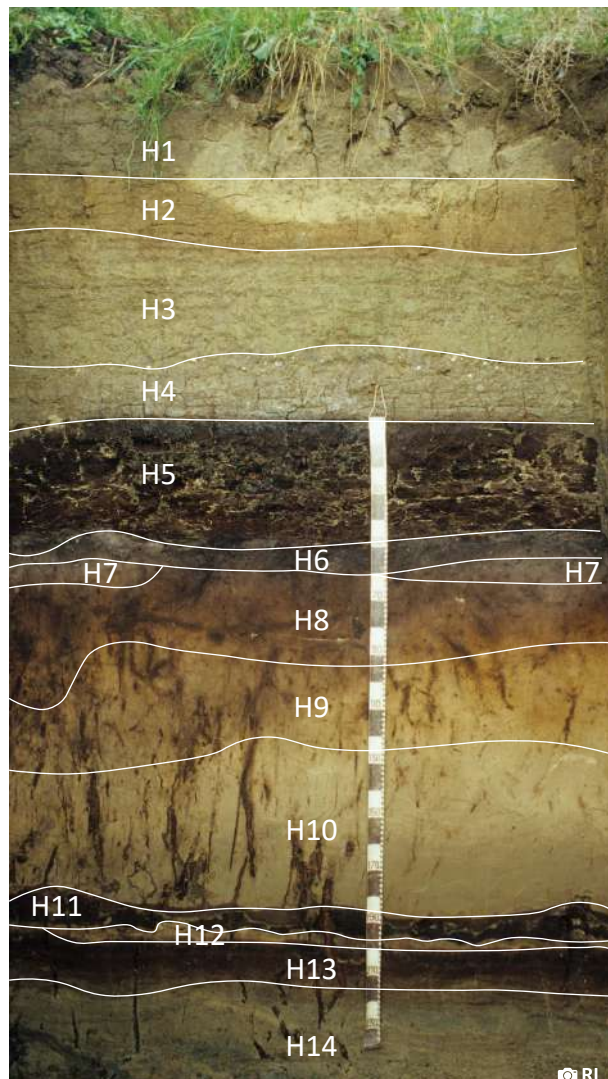


H1: 0-35 cm: A; oppervlaktehorizont die zelden onder water komt.

H2: 35-65 cm: B_l; zone van capillaire opstijging, gevlekte horizont met ijzerneerslag langs de wortelgangen waar occasioneel lucht (zuurstof) in de bodem dringt (concept van een 'gley'-horizont in de bodembodemkunde).

H3: 65-95 cm: C_r; permanent waterverzadigde horizont volledig gereduceerd. Ondanks de regelmatige sedimentatie is er geen stratificatie te bespeuren door de onafgebroken biologische activiteit van wortels.

Fig. E202: Kleirijk bodemprofiel ter hoogte van de schorre. Fig. E201-E202: Verdrongen Land van Saeftinghe, Nederland.



H1-H4: kleirijke historische polderafzettingen.

H5: holoceen veen.

H6-H9: grondwaterpodzol met A- (H6), E- (H7), B_h- (H8) en B-horizont (H9). Dit is het niveau van mesolithische occupatie.

H10-H12: moedermateriaal van laatglaciale dekzanden, met sporen van boomwortels die dateren van vóór de veenontwikkeling.

H11: waterhardafzetting (boven) op de oppervlakte A-horizont (onder) van laatglaciale bodem (Usselo-bodem?) (zie detail fig. P84).

H12: dun bandje dekzand.

H13: grondwaterpodzol met A, E en B_h horizont (Usselo-bodem?).

H14: pleniglaciale dekzanden.

Fig. E203: Diep profiel in het Schelde-estuarium: onder de veenlaag komen er een grondwaterpodzol en waterhardlagen voor. Een mesolithische site is aangetroffen in de dekzanden. Verrebroek, provincie Oost-Vlaanderen, België. (Crombé *et al.*, 1999; Bastiaens *et al.*, 2005).

REFERENTIES

- Ampe, C. & Langohr, R., 2003. Morphological characterization of humus forms in recent coastal dune ecosystems in Belgium and northern France. *Catena*, 54, 363-383.
- Ampe, C., Bosmans, E., Defrijn, S., Vancampenhout, K. & Wouters, K., 2006. Project waardevolle bodems in Vlaanderen. Eindverslag. Vlaamse Overheid, Dienst Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen, 208 pp.
- Ampe, C., Langohr, R., Van Ranst, E., Finke, P., Deckers, S. & Poesen, J., 2015. Bodem. In: *Geologie van Vlaanderen* (ed. Borremans, M.), 260-338. Academia Press, Gent, 491 pp.
- Annaert, R., Cooremans, B., Ervynck, A., Demiddele, H., Fechner, K. & Langohr, R., 1993. Een Viereckschanze op de Alfsberg te Kontich (provincie Antwerpen): meer dan een cultusplaats. *Archeologie in Vlaanderen*, III, 53-125.
- Bastiaens, J., 1994. Plaggenbodems in de Antwerpse Kempen. *Koninklijke Aardrijkskundige Genootschap van Antwerpen*, Jaarboek 100, Kontich, 24-40.
- Bastiaens, J., Crombé, Ph., Deforce, K., Ervynck, A., Gelorini, V., Klinck, B., Langohr, R., Lentacker, A., Louwagie, G., Meersschaert, L., Perdaen, Y., Sergeant, J., Van Neer, W., Van Strydonck, M. & Verbruggen, C., 2005. *The Last Hunter-Gatherer-Fishermen in Sandy Flanders (NW-Belgium). The Verrebroek and Doel Excavation Projects. Volume 1: Palaeo-environment, chronology and features* (Ed. Crombé, Ph.). With minor contributions from Bats, M., Cordemans, K., Craig, O., Van der Putten, N. & Vrydaghs, L. Archaeological Reports Ghent University 3, 334 pp.
- Beerten, K., 2019. Drift sand-podzol hydrosequences in the Mol-Dessel area, NE Belgium. In: *Soils as records of past and Present. From soil surveys to archaeological sites: research strategies for interpreting soil characteristics* (eds. Deák, J., Ampe, C. & Mikkelsen, J.), 89-97. Proceedings of the Geoarchaeological Meeting, Bruges (Belgium), 6 & 7 November 2019. Raakvlak, Bruges, 319 pp. DOI: <http://10.5281/zenodo.3420877>.
- Bourgeois, J., 1990. Nécropoles et "sanctuaires" de La Tène en Flandre. In: *Les Celtes en France et du Nord et de Belgique VIe – Ier Siècle avant J.-C.*, 117-119. Crédit Communal, Bruxelles, 280 pp.
- Bourgeois, J., 1998. La nécropole laténienne et gallo-romaine d'Ursel-Rozestraat (Flandre orientale - Belgique). *Revue archéologique de Picardie*, 1998, 1-2, 111-126.
- Bourgeois, J. & Rommelaere, J., 1991. De opgravingen te Ursel (1985-1989) en Aalter (1989-1990). *Appeltjes van het Meetjesland*. Jaarboek van het Heemkundig Genootschap Meetjesland, 42, 59-88.
- Bryan, R., 1987. Processes and significance of rill development. In: *Rill Erosion, Processes and Significance* (ed. Bryan, R.), 1-15. Catena Supplement, 8, 160 pp.
- Campy, M. & Macaire, J.J., 2003. *Géologie de la surface. Erosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux*. Dunod, Paris, 440 pp.
- Ciezar, P., Gonzales, V., Pieters, M., Rodet-Belarbi, I. & Van Ossel, P., 1994. In Suburbano- New data on the immediate surroundings of Roman and Early Medieval Paris. In: *Urban-rural connexions: perspectives from environmental archaeology* (eds. Hall, A. & Kenward, H.), 137-146. Oxbow monograph, 47, 176 pp.
- Cornelis L., Cosyns P., Langohr R., Mikkelsen J. & Sevens, W., 2012. Archeologische prospectie met ingreep in de bodem te Rotselaar – Terheidelaan (Vlaams Brabant). Triharch, Rapport 2010-10, 63 pp.
- Crombé, Ph., Deforce K., Langohr R., Louwagie G., Perdaen Y., Sergeant J. & Verbruggen C., 1999. A small Final-Palaeolithic knapping site at the Verrebroek 'Dok 2' (Flanders, Belgium). *Notae Praehistoricae*, 19, 63-68.
- DeBano, L., 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology*, vol. 231-232, 195-206.
- Deckers, J., 1966. Contribution à l'étude de la composition et de la capacité de production des sols de l'Ardenne centrale et de la Famenne orientale. *Pédologie*, Mémoire 3, 293 pp.
- Dekker, L.W., 1998. Moisture variability resulting from water repellency in Dutch soils. Ph.D. thesis, Landbouw universiteit Wageningen, The Netherlands.
- De Ploey, J., 1997. Actieve hellingserosie in België. *Bulletin van de Belgische Vereniging voor Geologie*, 88, 2, 137-142.
- De Ploey, J., 1984. Hydraulics of runoff and loess loam deposits. *Earth Surface Processes and Landforms*, 533-539.
- De Reu, J., Bourgeois, J., De Smedt, P., Zwertvaegher, A., Antrop, M., Bats, M., De Maeyer, P., Finke, P., Van Meirvenne, M., Verniers, J. & Crombé, Ph., 2011. Measuring the relative topographic position of archaeological sites in the landscape, a case study on the Bronze Age barrows in northwest Belgium. *Journal of Archaeological Science*, 38, 12, 3435-3446.
- Dupouey, J.-L., Dambrine, E., Laffite, J.-D. & Moares, J., 2002. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology*, 83, 11, 2978-2984.
- FAO, 1965. *Soil erosion by water, some measures for its control on cultivated lands*. FAO Agricultural Development Paper N° 81, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 284 pp.
- Fechner, K., 2000. Comparaison des histoires pédo-sédimentaires des fossés protohistoriques étudiés en Belgique et dans le Nord de la France. *Revue Archéologique de Picardie*, 1/2, 23-56.

- Fechner, K. & Langohr, R., 1993. Bodemkundige gegevens en interpretatie. In: Een Viereckschanze op de Alfsberg te Kontich (provincie Antwerpen): meer dan een cultusplaats (ed. Annaert, R.), 85-90. *Archeologie in Vlaanderen*, III, 53-125.
- Fechner, K., Langohr, R. & Devos, Y., 2004. Archaeopedological checklists. Proposal for a simplified version for the routine archaeological record in Holocene rural and urban sites of Nord-Western Europe. In: *Digging in the dirt: excavations in a new millennium* (ed. Carver, G.), 240-256. John and Erica Hedges Ltd, Oxford. British Archaeological Reports, International Series 1256, 268 pp.
- Fechner K., Baes R., Louwagie G. & Gebhardt A., 2014. Relic Holocene colluvial and alluvial depositions in the basins of the Scheldt, the Meuse, the Somme, the Seine and the Rhine (Belgium, Luxemburg and Northern France). A prospective state of research in rescue excavations. In: *The Archaeology of Erosion, the Erosion of Archaeology* (eds. Meylemans E., Poesen J. & In 't Ven I.), 147-190. Proceedings of the Brussels Conference, April 28-30 2008, Relicta Monografieën 9, 190 pp.
- Feda, J., 1992. *Creep of soils and related phenomena*. Elsevier, 422 pp.
- Gullentops, F. & Wouters, L., 1996. *Delfstoffen in Vlaanderen*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap – afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie, Brussel, 198 pp.
- Hutchinson, J. & Stuart, J., 2003. Analyses of the morphological changes with time, through denudation and siltation, in ditches of trapezoidal and triangular section. *Journal of Archaeological Science*, 30, 7, 797-808.
- Jansen, P. & van Benthem, M., 2005. *Historische boselementen. Geschiedenis, herkenning en beheer*. Stichting Probos, Geldersch Landschap en Geldersche Kasteelen, Waanders Uitgevers, 127 pp.
- Langohr, R., 1990. L'homme et les processus d'érosion des sols limoneux de Belgique et du Nord Ouest de la France. In: *Les Celtes en France du Nord et en Belgique, VI - 1er siècle avant J. C.*, 211-222. Crédit Communal, Bruxelles, 280 pp.
- Langohr, R., 2000. Creusement, érosion et comblement des fosses; l'approche des Sciences de la Terre. *Revue Archéologique de Picardie*, 1/2, 57-65.
- Langohr, R., 2001. L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien – Apports de l'archéopédologie. *Etude et Gestion des sols*, 8, 2, 103-118.
- Langohr, R., 2008. Bosreservaat Pruikenmakers (Meerdaalwoud). Rapport Bodemprospectie. ASDIS, Brussel, 104 pp.
- Langohr, R., 2009a. Het Zoniënwoud, uniek voor aardwetenschappen en archeologie. In *"Het Zoniënwoud, Een nieuwe visie op een patrimonium met toekomst"* (ed. De vrienden van het Zoniënwoud), 181-195. Mardaga, Waver, 240 pp.
- Langohr, R., 2009b. Sciences de la terre : les facteurs de l'environnement du site de Glimes et les sols. In: *Le tumulus gallo-romain de Glimes (Incourt)* (eds. Massart, C., Defgnée, A., Langohr, R. & 'T Kint, S.), 34-54. Rapport 2003 des fouilles réalisées en 2002. Institut du Patrimoine wallon, Etudes et Documents, Archéologie 13, Namur, 100 pp.
- Langohr, R. & Fechner, K., 1993. The digging and filling of Iron Age monument ditches in the sandy area of north-west Belgium : the pedological and palaeo-environmental approach. *Lunula, Archaeologia Protohistorica*, I, 45-50.
- Langohr, R. & Sanders, J., 1985a. The Belgian loess belt in the last 20 000 years: Evolution of soils and relief in the Zonien Forest. In: *Soils and Quaternary Landscape evolution* (ed. Boardman, J.), 359-371. John Wiley and Sons Ltd., 402 pp.
- Langohr, R. & Sanders, J., 1985b. Etude pédologique du site de Darion: données préliminaires. *Bulletin de la Société Royale Belge d'Anthropologie et de Préhistoire*, 96, 17-30.
- Langohr, R. & Poesen, J., (eds.), 2007. Excursion Guide "Soil evolution in and on Tertiary sediments in North-West Belgium. A record of past environmental evolution and impact on present-day processes". Soil Sci Soc. of Belgium, Annual Excursion 2007.
- Langohr, R. & Nicosia, C., 2015. Neerpelt, Kolisbos Celtic Fields. Final report Archaeopedology. In: Een archeologische evaluatie en waardering van Celtic Fields in het Kolisbos (Neerpelt, provincie Limburg) (eds. Vanmontfort, B, Langohr, R., Marinova, E., Nicosia, C. & Van Impe, L.), Bijlage 6, 31pp. Agentschap Onroerend Erfgoed, 161 pp. DOI: 10.13140/RG.2.2.33202.40642
- Le Bissonnais, Y. & Bruand, A., 1993. Crust micromorphology and runoff generation on silty materials during different seasons. In: *Soil Surface Sealing and Crusting* (eds. Poesen, J. & Nearing, A.), 1-16. Catena Supplement, 24, 139 pp.
- Leopold, M. & Völkel, J., 2007. Colluvium: Definition, differentiation, and possible suitability for reconstructing Holocene climate data. *Quaternary International*, 162, 5, 133-140.
- Lindemans, P., 1952. *Geschiedenis van de landbouw in België* (2 delen). Antwerpen.
- Lindstrom, M., Lobb, A. & Schumacher, T., 2001. Tillage Erosion: An Overview. *Annals of Arid Zone*, 40, 3, 337-349.
- LNE, 2011. *Erosie in Vlaanderen*. Vlaamse Overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, Brussel, 44 pp.

- Maréchal, R., 1958. Contribution à l'étude des terrains superficiels de la région condrusienne. *Société belge de Pédologie*, Mémoire 1, 320 pp.
- Meylemans, E. & Petermans, T., 2017. Het gebruik van laseraltimetrische gegevens en het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen in het kader van archeologisch en landschap-pelijk onderzoek. Enkele basisprincipes en richtlijnen. Handleidingen agentschap Onroerend Erfgoed 17, Brus-sel, 61 pp.
- Mikkelsen, J. & Langohr, R., 1996. A pedological charac-terisation of the Aubechies soil, a well preserved soil sequence dated to the earliest Neolithic agriculture in Belgium. In: Proc. XIII Int. Congress Prehistoric and Pro-tohistoric Sciences, Vol. 3: Paleoecology, 143-149. ABA-CO, Forly, Italy, Sept. 1996.
- Mikkelsen, J., Langohr, R. & Vanwesenbeeck, V., 2002. Bo-demkundig onderzoek op de archeologische site Ekeren Het Laar, Provincie Antwerpen, België. Archaeologisch onderzoek van het HSL-traject Antwerpen- Nederlandse grens. Provinciebestuur van Antwerpen, Archeo-Bodem-kundige rapport nr. 1, 120 pp.
- Mikkelsen, J., Langohr, R., Vanwesenbeeck, V., Bour-geois, I. & De Clercq, W., 2019. The byre's tale. Farming nutrient-poor cover sands at the edge of the Roman Em-pire (NW-Belgium). In: *Soils as records of past and Pre-sent. From soil surveys to archaeological sites: research strategies for interpreting soil characteristics* (eds. Deák, J., Ampe, C. & Mikkelsen, J.), 65-84. Proceedings of the Geoarchaeological Meeting, Bruges (Belgium), 6 & 7 November 2019. Raakvlak, Bruges, 319 pp. DOI: <http://10.5281/zenodo.3421029>.
- Miller, B. & Juilleret, J., 2020. The colluvium and allu-vium problem: Historical review and current state of definitions. *Earth-Science Reviews*, 209, art. no. 103316.
- Paillet, A., 2005. *Archéologie de l'agriculture moderne*. Paris. Editions Errance, 288 pp.
- Pécrot, A., 1956. *Etude détaillée des sols de la Hesbaye Occidentale; application à quelques problèmes d'actuali-té*. Centre de Cartographie des Sols, 268 pp.
- Pieters, M., 1986. Ontwikkeling en toepassing van bo-demprospectietechnieken voor archeologische sites van de Belgische zand- en leemstreek. Niet gepubliceerde M.Sc. thesis, Univ. Gent, 138 pp.
- Pieters, M., 1990. Bemesting en aanverwante grondver-beteringspraktijken archeologisch bekeken. *Archeologie*, 5-9.
- Pissart, A., 1987. *Géomorphologie périglaciaire*. Textes des leçons de la Chaire Francqui belge. Laboratoire de Géomorphologie et de Géologie du Quaternaire, Univer-sité de Liège, 135 pp.
- Poesen, J., 1987. Transport of rock fragments by rill flow – A field study. In: *Rill Erosion, Processes and Significance* (ed. Bryan, R.) 35-54, Catena Supplement, 8, 160 pp.
- Pouquet, J., 1966. *Les sols et la géographie – initiation géopédologique*. Ed. Sedes, University of Wisconsin- Ma-dison, 269 pp.
- Radcliff, T., 1819. *A report on the agriculture of eastern and western Flanders*. Londen. (referentie uit Trommel-mans, J. 1984).
- Ruysschaert, G., Poesen, J., Verstraeten, G. & Govers, G., 2004. Soil loss due to crop harvesting: significance and determining factors. *Progress in Physical Geography*, 28, 4, 467-501.
- Sanders J., Langohr, R. & Cuyckens, G., 1985. Bodems en reliëf in het Zoniënbos. Inleiding tot een excursie. *De Aardrijkskunde*, 1985, 2, 87-133.
- Schwerz, J., 1807-1811. *Anleitung zur Kenntnis der Belgi-schen Landwirtschaft*. 3 delen, Halle.
- Selby, M., 2005. *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press, Oxford, 451 pp.
- Sigaut, F., 1975. *L'agriculture et le feu; rôle et place du feu dans les techniques de préparation du champ de l'ancien-ne agriculture européenne*. Paris-La Haye, Mouton et Cie, Cahiers des Etudes rurales, 1, 320 pp.
- Snacken, F., 1961. Streekindeling en begrenzing van het Land van Waas. *Tijdschrift van de Belgische Vereniging voor aardrijkskundige studies*, XXX, 1, 217-255.
- Soil Survey Staff., 1951. *Soil Survey Manual*. U.S. Dep. Agr. Handb. 18. U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C., 503 pp.
- Spek, T., 1992. The Age of the Plaggen Soils. In: The trans-formation of the European Rural Landscape: Methodo-logical issues and agrarian change 1770-1914 (eds. Ver-hoeve, A. & Vervloet, J.), 72-91. *Belgische Vereniging voor Aardrijkskundige Studies (BEVAS)*, 61, 1, 362 pp.
- Trommelmans, J., 1984. Een zeldzaam verslag over de toestand van de landbouw in het Land van Waas en in beide Vlaanderen in het begin van de XIXde eeuw. *Anna-len van de Koninklijke Oudheidkundige Kring van het Land van Waas*, 87, 255-256.
- van Aelbroeck, J., 1823. *Werkdadige Landbouw – Konst der Vlamingen*. Snoeck-Ducaju, Gent, 314 pp.
- van Beek, R., Cammeraat, E., Andreu, V., Mickovski, S. & Dorren, L., 2008. Hillslope processes: mass wasting, slope stability and erosion. In: *Slope stability and erosion con-trol: Ecotechnological solutions* (eds. Norris, J., Stokes, A., Mickovski, S., Cammeraat, E., van Beek, R., Nicoll, B. & Achim, A.), 17-64. Springer, 287 pp.
- Van Den Eeckhout, M., Poesen, J. & Verstraeten, G., 2007. Mass movements in the Flemish Ardennes: causes and consequences. In: Soil evolution in and on tertiary sedi-ments in north-west Belgium (eds. Langohr, R. & Poesen, J.). SSSB annual excursion 2007, 41 pp.

474 – Veldbodemkunde voor archeologisch onderzoek

- Van Den Eeckhout, M., Kerle, N., Poesen, J. & Hervas, J., 2012. Object-oriented identification of forested landslides with derivatives of single pulse LiDAR data. *Geomorphology*, 173-174, 30-42.
- Van de Vijver, M., Dalle, S., Sergeant J., De Mulder, G., Langohr R., Van Meirvenne M., Ameloot N., Simpson D., Saey T., Bourgeois J. & Crombé P., 2009. Evaluatie en waardering van de archeologische sites Rooiveld-Papevijvers, Oostkamp (West-Vlaanderen). *UGent Archeologische Rapporten* 17, 160 pp.
- Van Driessche, T., 2021. Rabattenbossen in Vlaanderen. Een verkennend Onderzoek. Onderzoeksrapporten agentschap Onroerend Erfgoed nr. 169, 57 pp.
- Van Hove, R., 1997. De “klassieke” bolle akkers van het Waasland in archeologisch perspectief. *Annalen van de Koninklijke Oudheidkundige Kring van het Land van Waas*, 100, 283-328.
- Van Kerckhoven, S., Riksen, M. & Cornelis, W., 2009. Afbakening van gebieden gevoelig aan winderosie in Vlaanderen. *UGent, BOD/STUD/2007/02*, 69 pp.
- Van Oost, K. & Govers, G., 2006. Tillage Erosion. In: *Soil Erosion in Europe* (eds. Boardman, J. & Poesen, J.), 599-621. John Wiley & Sons, Ltd., 855 pp.
- Van Vliet-Lanoë, B., Helluin, M., Pellerin, J. & Valadas, B., 1992. Soil erosion in Western Europe: from the Last Interglacial tot the Present. In: *Past and Present Erosion* (ed. Bell, M. & Boardman, J.), 101-114. Oxbow monograph 22, 250 pp.
- Washburn, A., 1979. *Geocryology. A Survey of Periglacial Processes and Environments*. London: Edward Arnold. 406 pp.
- Zadorova, T. & Penizek, V., 2018. Formation, morphology and classification of colluvial soils: a review. *European Journal of Soil Science*, 69, 4, 577-591.

Schriftelijke mededeling

P. Deproost (mail 12 februari 2025)

J. Van Roo (mail 03 februari 2025)



Vlaanderen
is erfgoed

<https://doi.org/10.55465/AWZG6801>
ISBN 9789075230871
D/2025/3241/310



Agentschap
Onroerend Erfgoed



VLAAMSE
LAND
MAATSCHAPPIJ



RAAKVLAK
Onroerend Erfgoed Brugge en Ommeland

B R U
G G E

